



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus- ja maaehitusinstituut

**Andres Jürgenson**  
**Rain Allikmäe**

**PÕHUPAKKIDEST SOOJUSTUSEGA  
PUTKARKASSHOONETE EHITAMISE TEHNOLOOGIA  
JA EKSPLUATATSIOON**

**THE EXPLOITATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY  
OF STRAW-BALE INSULATED TIMBER-FRAMED  
BUILDINGS**

Magistritöö  
Maaehituse õppekava

Juhendajad: nooremteadur Martti-Jaan Miljan  
professor Jaan Miljan

Tartu 2017

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Andres Jürgenson, Rain Allikmäe		Õppekava: maaehitus	
Pealkiri: Põhupakkidest soojustusega puitkarkasshoonete ehitamise tehnoloogia ja eksploatatsioon			
Lehekülgi: 131	Jooniseid: 54	Tabeleid: 16	Lisasid: 9
Osakond:		Maaehitus	
Uurimisvaldkond:		Ehitusfüüsika	
		Ehitustehnoloogia	
		Ehitusökonomika	
Juhendaja(d):		Martti-Jaan Miljan	
		Jaan Miljan	
Kaitsmiskoht ja aasta:		Tartu 2017	
<p>Kaasaegne ehitustegevus mõjutab meid ümbritsevat olustikku - materjalide tootmiseks ja transpordiks märgatavalt suurenev energiakulu on jätnud jälje ühiskonna jätkusuutlikule arengule.</p> <p>Käesoleva magistritöö peamine eesmärk on kandva puitkarkassiga põhupakkidega soojustatud välisseinte ehitamistehnoloogia erinevate aspektide uurimine, propageerida looduslikke ja taastuvaid ehitusmaterjale ning pöörata tähelepanu säästvale ja keskkonnasõbralikule ehitamisele.</p> <p>Uuritavaks katsehooneks on autorite poolt ehitatud Leigo talu saunahoone. Töös on analüüsitud hoone planeerimise ja projekteerimise protsessi, kandvate tarindite ehitust, põhupakkide varumise, paigaldamise ja viimistlemisega seotud protseduure ning ehituse maksumust. Uurimustöö tulemusena võrreldakse erineva niiskuskooormuse ja temperatuuriga katsehoone välisseinatarindi soojapidavust ja niiskusrežiimi statsionaarsetes tingimustes arvutatud tulemusi katsete käigus mõõdetud tulemustega.</p> <p>Katsehoone ehitusega Leigo tallu alustati augustis 2016 ning ehitustööd lõpetatakse 2017. aasta juuni lõpuks. Ehitusfüüsikaliste parameetrite mõõtmised katsehoones kestsid 12.2016 kuni 04.2017, mille tulemuste põhjal saadi põhupakkidega soojustatud välisseina soojusläbivuse väärtuseks <math>U=0,15</math> (W/m<sup>2</sup>K), mis on väiksem kui statsionaarsetes tingimustes arvatud piirdetarindi korregeeritud soojusläbivuse väärtus (<math>U_c=0,16</math> W/m<sup>2</sup>K).</p> <p>Niiskusrežiimi seisukohast vajab kõrgendatud tähelepanu põhupakkide ja välisviimistluskrohvi vaheline tsoon, kus difusiooni tõttu on kondensaadi tekkimise oht. Katseliselt mõõdetud tulemuste põhjal on aasta lõikes põhupakkide ja välisviimistluskrohvi (lubikrohvi) tsoonis aurustunud vee hulk oluliselt suurem kui kondenseerunud vee hulk, seega jõuab talveperioodil tekkida võib kondensaat välja kuivada.</p> <p>Katsehoone ehituse kogumaksumusest moodustas tööjõukulu 47 % ning materjalikulu 53 %. Materjali sisendenergia kogu hoone ehitusel on 63052,86 MJ (17514,7 kWh).</p> <p>Lõputöö tulemusena võib järeldada, et väikepõhupakkidest piirdetarindite ehitamine on Eesti kliimatingimustes sobiv. Uurimustöö autorid soovivad põhupakkidest seintega hoonete välisviimistluseks kasutada lubikrohvi ning siseviimistlusel nii lubi- kui savikrohvi.</p>			
Märksõnad: keskkonnasäästlik ehitamine, väikepõhupakkidest hooned, materjalide sisendenergia, niiskusrežiimi hindamine, soojusläbivus			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Andres Jürgenson, Rain Allikmäe		Specialty: Rural Engineering	
The exploitation and construction technology of straw-bale insulated timber-framed buildings.			
Pages: 131	Figures: 54	Tables: 16	Appendixes: 9
Department:		Rural Engineering	
Field of research:		Building Physics. Building Technology. Construction Economics	
Supervisors:		Martti-Jaan Miljan Jaan Miljan	
Place and date:		Tartu 2017	
<p>Contemporary construction activities affect our surroundings daily - the significant increase in energy consumption in the production and transportation of construction materials has left a mark on the sustainable development of our society.</p> <p>The underlying aim of this masters' dissertation is to investigate and analyse the different aspects of timber-framed, straw-bale insulated exterior wall construction technologies, to advocate natural and renewable construction materials and guide attention to efficient and environmentally friendly building construction.</p> <p>The test building used for supporting this thesis is the sauna building of Leigo farm, built by the writers of this dissertation. This paper analyses the processes of project planning, construction of building envelopes, the sourcing, installation and rendering of straw bale and its' construction processes and cost. The result of this paper compares the exterior building envelope's thermal conductivity and moisture regime in stationary conditions to the measurements obtained during the relevant testing processes.</p> <p>The construction of the test building in Leigo farm commenced in August 2016 and will be completed by the end of June, 2017. Measuring the parameters of building engineering physics was carried out between December 2016 and April 2017 and the results showed that the thermal conductivity of the straw-bale insulated exterior walls was <math>U=0,15</math> (W/m<sup>2</sup>K), which is smaller than the calculations of the adjusted thermal conductivity of the exterior building envelope made in stationary conditions (<math>U_c=0,16</math> W/m<sup>2</sup>K).</p> <p>With regards to the moisture regime, the area between the straw bales and exterior rendering requires increased attention - due to diffusion, there is a threat of condensation occurring in this area. Based on the calculations, the amount of vaporised water is significantly bigger than the amount of condensation between the straw bale and exterior rendering (lime plaster), therefore allowing any potential condensation occurring during the winter months, to dry.</p> <p>The cost of labour made up 47% of the total cost of the test building, leaving 53% for the</p>			

cost of materials.

Based on the results of this research paper, we can conclude that building envelopes using small straw bales are an appropriate construction method within the Estonian climate.

The writers of this research paper recommend using lime plaster for exterior rendering of straw-bale constructions and both lime plaster or clay plaster for interior rendering.

**Keywords:** environmentally sustainable construction, straw-bale buildings, assessing the moisture regime, thermal conductivity, embodied energy.

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	7
1. PÕHUPAKKIDE KASUTAMINE EHITUSES .....	9
1.1 Põhupakkidest ehitamine läbi ajaloo .....	9
1.2 Põhupakkide klassifikatsioon ja omadused .....	10
1.2.1 Põhu omadused .....	10
1.2.2 Põhupakkide valik ja ladustamine .....	11
1.2.3 Põhupakkide mõõtmised .....	13
1.3 Põhupakkide ehitusfüüsikalised omadused .....	14
1.3.1 Soojusjuhtivus .....	14
1.3.2 Niiskus põhuehitises .....	16
1.3.3 Veeaurutihedus .....	17
1.3.4 Sorptsioonniiskus .....	17
1.3.5 Tulekindlus .....	18
2. KANDVA PUITTARINDUSEGA PÕHUPAKKIDEST SOOJUSTUSEGA HOONETE EHITAMISE TEHNOLOOGIA .....	20
2.1 Vundamendid ja põrandad .....	21
2.2 Seinad .....	23
2.3 Viimistlus .....	29
2.3.1 Lubikrohv .....	30
2.3.2 Savikrohv .....	32
2.3.3 Lubikrohv tadelakt .....	34
3. PÕHUPAKKIDEST SAUNAHOONE VÄLISSEINA SOOJUS- JA NIISKUSTEHNILISE TOIMIVUSE ARVUTUSLIK KONTROLL .....	35
3.1 Mittehomogeensetest kihtidest välisseina arvutuslik soojuslääbivus statsionaarsetes tingimustes .....	35
3.2 Mittehomogeensetest kihtidest välisseina arvutuslik niiskusrežiim statsionaarsetes tingimustes .....	40
3.2.1 Eesti niiskustehnilise baasaasta analüüs lähipiirkonnas kuude lõikes Tartu põhjal .....	40
3.2.2 Saunahoone välisseina niiskustehniline analüüs kuude lõikes .....	42
4. PÕHUPAKKIDEST SAUNAHOONE EHITUS LEIGO TALUS .....	50
4.1 Kavandamine ja projekteerimine .....	50
4.2 Vundamendi ehitus .....	52
4.3 Kandva puitkarkassi ehitus .....	53
4.4 Põhupakkide paigaldus ja viimistlemine .....	55
4.4.1 Põhupakkide varumine .....	55
4.4.2 Põhupakkide paigaldus .....	57
4.4.3 Põhuseinte viimistlemine .....	61
4.5 Leigo talu saunahoone ehitustegevusega seotud kulud .....	65
4.6 Leigo talu saunahoone ehitusmaterjalide sisendenergia .....	69
5. PÕHUPAKKIDEST SAUNAHOONE EHITUSFÜÜSIKALISED MÕÕTMISED LEIGO TALUS .....	74
5.1 Mõõtmiste eesmärk .....	74
5.2 Mõõteseadmete ja meetodika kirjeldus .....	74
5.3 Saunahoone välisseina soojus- ja niiskustehniliste parameetrite mõõtmistulemused ja analüüs .....	81

KOKKUVÕTE .....	93
KASUTATUD KIRJANDUS .....	96
SUMMARY .....	100
LISAD .....	104
Lisa 1. Põhupakkidest saunahoone mittehomogeense välisseina soojusläbivuse arvutus (EVS-EN ISO 6946:2008).....	105
Lisa 2. Eesti niiskustehnilise baasaasta analüüs lähipiirkonna „Tartu“ põhjal (EVS-EN ISO 13788:2012 ja ET-2 0102-0329 2000) .....	108
Lisa 3. Põhupakkidest saunahoone mittehomogeense välisseina niiskustehniline arvutuslik analüüs tsoonis A (EVS-EN ISO 13788:2012) .....	109
Lisa 4. Põhupakkidest saunahoone mittehomogeense välisseina õhuniiskuse kondenseerumise ja aurustumise arvutuslik kontroll (ET-2 0404-0764) .....	115
Lisa 5. Põhupakkidest saunahoone ehituspäevik.....	116
Lisa 6. Põhupakkidest saunahoone ehitustöödega seotud kulud .....	119
Lisa 7. Põhupakkidest saunahoone mittehomogeense välisseina mõõtmistulemused „puhkeruumis“ 30 min intervalliga 01.01.2017-24.04.2017 ja niiskustehniline analüüs tsoonis A.....	122
Lisa 8. Põhupakkidest saunahoone mittehomogeense välisseina mõõtmistulemused „leiliruumis“ 30 min intervalliga 01.01.2017-24.04.2017 ja niiskustehniline analüüs tsoonis A.....	125
Lisa 9. Põhupakkidest saunahoone mittehomogeense välisseina mõõtmistulemused „leiliruumis“ 1 min intervalliga 21.04.2017 kell 18:00 – 23.04.2017 kell 24:00 ja niiskustehniline analüüs tsoonis A. ....	128

## Sissejuhatus

Kaasaegne ehitustegevus mõjutab meid ümbritsevat olustikku - materjalide tootmiseks ja transpordiks märgatavalt suurenev energiakulu on jätnud jälje ühiskonna jätkusuutlikule arengule. See on viinud tarbijad arusaamisele, et lisaks tööstuslikult toodetud ehitusmaterjalidele on võimalik sooja- ja vastupidavate hoonete ehitamiseks kasutada väiksema primaarenergiakuluga looduslikke ehitusmaterjale, näiteks põhk, pilliroog, savi jne.

Looduslikke ehitusmaterjale on erinevas mahus ning aegadel kasutatud juba aastasadu. Põhupakkidest hoonete ehitamine sai alguse 19. sajandi lõpus Ameerika Ühendriikidest, kust levis edasi Euroopasse 20. sajandi alguses. Eestis on põhupakkidest soojustusega välispiirete ehitamist tänaseks päevaks suhteliselt vähe uuritud ning seetõttu on antud uurimustöö plaan selle teema teadmiste varamut suurendada.

Antud magistritöö eesmärk on propageerida looduslikke ja taastuvaid ehitusmaterjale ning pöörata tähelepanu säästvale ja keskkonnasõbralikule ehitamisele. Peamiselt hõlmab antud magistritöö puitkarkassist põhupakkidega soojustatud välisseinte ehitamistehnoloogiat erinevate aspektide uurimist – meetodid, sõlmede lahendused ja töövõtted. Uurimustöö tulemusena ehitatakse reaalne katsemaja ning hinnatakse selle ehitustegevusega seotud kulusid, teostatavust ning ehitusmaterjalide sisendenergiat. Ühtlasi on töö autoritel plaanis kasutada põhupakkidest seinte sise- ja välisviimistluseks looduslike viimistlusmaterjalidena lubi- ja savikrohvi.

Lisaks on lõputöös olulist rõhku pööratud väikepõhupakkidest välispiirde soojus- ja niiskustehniliste omaduste mõõtmisele ja analüüsimisele. Tulemini jõudmiseks on uuritud nii normaaltingimustel eluruumiks mõeldud sisekliimaga keskkonda kui ka ekstreemsema temperatuuri ning õhuniiskusega leiliruumi. Ehitusfüüsikaliste parameetrite leidmisel võrreldakse erineva niiskuskooormuse ja temperatuuriga katsehoone välisseinatarindi soojapidavust ja niiskusrežiimi statsionaarsetes tingimustes arvutatud tulemusi katsete käigus mõõdetud tulemustega. Saadud andmete põhjal hinnatakse põhupakkidest soojustusega piirdetarindite sobivust Eesti kliima tingimustes.

Käesoleva magistritöö sisuline osa on jagatud viide jaotisesse. Esimeses peatükis antakse ajalooline lühiülevaade põhupakkide ehitusest läbi aastate ning tutvustatakse põhu ja põhupakkide mehaanilisi ning ehitusfüüsikalisi omadusi. Töö teises osas keskendutakse kandva puittarindusega põhupakkidest soojustusega hoonete ehitamisele. Peamiselt on vaatluse all väikepõhupakkidest välisseinte ehitustehnoloogiate tutvustamine erinevate kirjandusallikate põhjal. Ühtlasi analüüsitakse ka viimistluseks kasutatava savi- ja lubikrohvi omadusi ning paigaldamise võimalusi.

Kolmandas peatükis teostatakse statsionaarsetes tingimustes 580 mm paksusega mittehomogeense põhupakkidest välisseina soojus- ja niiskustehniliste parameetrite arvutuslik kontroll. Seejuures kirjeldatakse arvutusmetoodikat ning antakse ülevaade kasutatavatest terminitest. Neljandas peatükis keskendutakse uuritava katsehoone (Leigo talu saunahoone) ehitusega seotud tegevustele – hoone planeerimisele, projekteerimisele, kandvate tarindite ehitusele, põhupakkide varumisele ja paigaldusele ning ehituskuludele. Lisaks leitakse katsehoone ehitamisega seotud materjalide sisendenergia.

Viiendas peatükis esitatakse katsehoones mõõdetud ehitusfüüsikalised tulemused puhke- ja leiliruumis, kirjeldatakse mõõtmismetoodikat ning võrreldakse omavahel mittestatsionaarsetes ja statsionaarsetes tingimustes arvutatud tulemusi. Esitatakse ka välispiirete pinnatemperatuuride mõõtmistulemused infrapunakaameraga.

Tööga seotud lisamaterjalidena tuuakse välja erinevad planeerimise ja ehitustegevusega seotud joonised ja tabelid – ehituspäevikud, ehitusmaksumus jne. Samuti on täiendava infona lisatud soojus- ja niiskustehniliste parameetrite arvutused ja nende tulemused.



# 1. PÕHUPAKKIDE KASUTAMINE EHITUSES

## 1.1 Põhupakkidest ehitamine läbi ajaloo

Looduslikud materjalid on erinevatel eesmärkidel olnud ehituses kasutuses juba inimkonna algusaegadest. Põhupakkidest majade ehitus sai alguse Ameerika Ühendriikidest 1800. aastate lõpus, kui leiutati esimesed pakkimismasinad. Nebraska väljade valged asunikud kasvasid vilja aladel, kus puudus ehitamiseks piisavalt puidu- ja kivimaterjali. Mööda raudteed saabuvat puidulasti tuli oodata järgmise kevadeni, mistõttu ehtasid asunikud omale viljapõhupakkidest ajutised varjualused. Põhupakid paigaldati üksteise peale kivimüüri ladumise viisil, mis moodustasid kandva seinakonstruktsiooni. Tänapäeval nimetatakse sellist ehitusviisi Nebraska ehk kandvate põhupakkseintega ehituseks. Asunikud avastasid, et põhupakkidest majad hoidsid neid külmal talvel soojas ning järgneval kuumal suvel piisavalt jahedas. Asunike positiivsed kogemused põhust seintega majades innustasid ehitama elamuteks püsivaid hooneid. (Amazon Nails 2001: 5)

Põhupakkidest majade aktiivne ehitus kestis 1940. aastateni, mil Teine maailmasõda ning tsemendi tootmise ja kasutamise kasv selle praktiliselt välja suretas. 1970. aastate lõpus avastasid põhupakiehituse Judy Knox ja Matts Myrhrman. Taaselustamise pioneerid uurisid ja avastasid väljasurnud ehitustehnoloogiaid ning jagasid teadmisi entusiastidest kuulajaskonnale. Idee levis kiiresti läbi roheline kultuuri ja liikumise. Suurem osa hoonetest püstitati iseseisvalt Nebraska ehitusviisi järgides. (Amazon Nails 2001: 5)

Põhupakkidest majad levisid esialgu ainult kuivas mandrilises kliimas, kuid hiljem leiti, et antud tüüpi hooneid on võimalik rajada ka niisketesse paikadesse, näiteks Põhja-Euroopa ja Skandinaavia riikidesse (Pere 2008). Säästva eluviisi koolitaja Sven Aluste hinnagul on 2011. aasta seisuga Eestisse ehitatud 40 põhumaja, sealhulgas suvemaju, saunasid ning abihooneid (Jõgeda 2011). Eesti Maaülikooli üliõpilase Kai Allika magistritöös kogutud andmete põhjal leiti Eestist 23 põhust ehitatud elumaja (Allikas 2015: 34). Suurem osa põhumaju asub Põhja-Eestis ja Tallinna ümbruses, vaid mõned üksikud on rajatud Lõuna-Eestisse. Majad on ehitatud mitmel ehitusviisil, millest levinuim on kandva puittarindusega põhupakkidest soojustusega tehnoloogia (Sealsamas: 34). Teadaolev Eesti esimene põhumaja ehitati Piritale 2006. aastal (Kirsipuu 2006).

Euroopa teadaolevalt vanim säilinud põhupakkidest ehitatud hoone asub Prantsumaal. "Maison Feuillet" (joonis 1) valmis aastal 1921 ning on tänapäevani kasutuses ([www.sites.google.com/a/compaillons.eu](http://www.sites.google.com/a/compaillons.eu)).



*Joonis 1. Euroopa teadaolevalt vanim põhupakkidest hoone Maison Feuillet*  
([www.sites.google.com/a/compaillons.eu](http://www.sites.google.com/a/compaillons.eu))

## **1.2 Põhupakkide klassifikatsioon ja omadused**

### **1.2.1 Põhu omadused**

Põhk on teravilja taimedest viljaterade eemaldamisel saadud jääkprodukt. Selle põhilisteks koostisosadeks on tselluloos, ligniin, räni ning vaha sarnane vett tõrjuv kiht (Minke, Mahlke 2005). Põhk on laialt levinud kohalik materjal ning sellest tulenevalt kulub transpordile minimaalselt energiat (Grätz, Indriksone 2011: 17). Ehitusmaterjalina on põhul energiat säästev ning süsihappegaasi emissiooni vähendav mõju, mis tuleneb teravilja kasvuperioodist (Amazon Nails 2001: 6). Põhk on looduslik materjal, mille tootmise energiaallikaks on päike (Sealsamas: 6). Tegemist on loodusliku materjaliga, mis vähendab töötlemise, taaskasutamise ja utiliseerimise mõju keskkonnale (Grätz, Indriksone 2011: 3).

Põhupakkide tootmiseks sobivaim teravili on nisu ja rukis, mis on stabiilsem võrreldes odra ja kaeraga. Tingituna kõrgest räni sisaldusest on põhu lagunemise protsess väga

aeglane. (Minke, Mahlke 2005). Tabelis 1 on esitatud erinevate teraviljade põhu keemilised koostised.

**Tabel 1.** Erinevate teraviljade põhu keemiline koostis (% kuivaines) (Sun, 2010)

<b>Tüüp</b>	<b>Veeslahustuvadained</b>	<b>Tselluloos</b>	<b>Hemitselluloos</b>	<b>Lingiin</b>	<b>Vaha</b>	<b>Tuhk</b>
Nisu	4,7	38,6	32,6	14,1	1,7	5,9
Rukis	4,1	37,9	32,8	17,6	4,1	3,0
Oder	6,8	34,8	27,9	14,6	6,8	5,7
Kaer	4,6	38,5	31,7	16,8	4,6	6,1

### 1.2.2 Põhupakkide valik ja ladustamine

Põhupakid varieeruvad pikkuse, kaalu, tiheduse ja kvaliteedi poolest, mida on võimalik reguleerida pakkimismasina seadistamisega. Iga aasta erineb nii teravilja saagikuse kui ka ilmastikutingimuste poolest, mis omakorda mõjutavad pakkimiseks sobiva materjali omadusi. Materjali kvaliteet võib sõltuda pakkimismasinast, operaatorist ning põhuvaalu ühtlusest antud pakkimismasina ees. Praktika on näidanud, et pakkide mõõdud ei pruugi kokku sobida masina poolt etteantud toote mõõtmetega. Üks võimalus kontrollimiseks on pakkide pikkuse mõõtmine pakkimise käigus. (Amazon Nails 2001: 12-13)

Esmatähtis soojapidava põhumaja ehitusel on kvaliteetsed põhupakid. Materjali leidmiseks tuleb kindlaks teha, kuidas ja millal on põhk kokku kogutud. Ehituseks kõlbulik põhk tuleb põllult koguda kuiva ilmaga. Soodsaim aeg põhu koristamiseks on keskpäevane päikesepaisteline ilm. Selle tingimuseks on õhu veeaurusisaldus, mis on hommikul suurem ning muutudes päeva jooksul väiksemaks. Põhupakkide ladustamiseks tuleb valida kuiv koht, mis oleks kaitstud vihma ja maapinna niiskuse eest. Märg põhk soodustab hallituse teket, mis muudab materjali ehituskõlbmatuks. Protsessi käigus on võimalik kontrollida põhupakkide niiskuse taset hügromeetriga, mille näit peab jääma alla 10 protsendi kuivkaalust. Mõõteriista puudumisel tuleb jälgida, et pakis ei esineks märgi tumedaid laiike ja kopituselõhna. (Corum, Goodall 2005: 37)

Põhupakid, mis on nii alt, pealt kui ka keskelt märgunud, on suure tõenäosusega ehituseks sobimatud. Maapinnal katmata ladustatud põhupakid muutuvad vihma käes kiiresti raskeks, küllastuvad veega ning on kasutuskõlbmatud. See kehtib ka seinaga paigaldatud

materjali kohta. Võimalusel tuleb põhku kaitsta tugeva ja pikaajalise külgvihma eest, et vihmavesi ei jõuaks sügavale paki sisemusse. Põhk märgub täpselt nii palju, kui sügavale tuul suudab vihma sisse kanda. Märgunud põhupakid ei ole siiski ilmtingimata kõlbmatud. Oluline on veenduda, et seinas olev sademetest niiskunud pakk on märg ainult külgedelt. Sellisel juhul kuivab põhk seinas õhu liikumise toimetel iseenesest ning see ei tekita hilisemaid probleeme. (Amazon Nails 2001: 12)

Põhupakkide niiskusesisaldust mõõdetakse kaasaskantava hügromeetriga (joonis 2).



**Joonis 2.** Kaasaskantav hügromeeter nimega *Protimeter Balemaster*  
([www.martinlishman.com](http://www.martinlishman.com))

Põhupakid peavad olema nööriga tihedalt kokku seotud (Amazon Nails 2001: 13). Sidumine pakkimismasinas tuleb seadistada maksimaalsele tugevusele. Tihedusest sõltub pakkide soojusisolatsioon ja kandevõime. Oluline on jälgida nööride kaugust paki servadest, mis on minimaalselt 100 mm, et vältida üle ääre mahalibisemist (Sealsamas: 13). Põhupakkide kokku sidumiseks kasutatakse erinevat tehnikat ja materjali. (Corum, Goodall 2005: 38). Rakendatud on metallist traadiga sidumise tehnikat, mis ei ole siiski soovitatav võimaliku niiskuse tekkimise tõttu ning võib omakorda põhjustada metalli korrodeerumist. Kasutusel olev pakinöör on valmistatud naturaalsest fiibrist, mis aja jooksul kulub ja võib katkeda ning ei ole seetõttu valitav. Sobivaim nöör ehitustöödeks on polüpropüleenist, mis on vastupidavam kulumisele. (Sealsamas: 38)

Põhupakkide kvaliteet sõltub suurel määral kasutatud taimede koostisest. Esmalt tuleb jälgida põllult koristatava põhu puhtust (Lacinski, Bergeron 2000). Pakitav põhk ei tohiks sisaldada viljapäid ega umbrohtu, mille sisaldus võib hiljemalt põhjustada põhu lagunemist (Sealsamas). Ehitamiseks sobivad pakid peaksid koosnema võimalikult paksudest ja tervetest kõrtest. Purustatud ja lühikesed kõrred vähendavad põhupaki struktuurset püsivust. (Corum, Goodall 2005: 37)

Maja ehitamisel tuleb töid planeerida eeldusel, et värskest kogutud pakid saaksid seina paigaldatud võimalikult kiiresti. Vastasel juhul võib langeda pakkide kvaliteet, mille põhjuseks on enamasti niiskus ja vihasajud. Kui mingil põhjusel ei ole seda võimalik koheselt teha, tuleb põhupakid ladustada kinnikaetult ja kompaktselt üksteise peale ehitatava maja kõrvale. Ehitamiseks sobivatel pakkidel puudub ebameeldiv niiskuse või hallituse lõhn ning on värvuselt tumekollased. (Corum, Goodall 2005: 38)

Ehitamiseks tuleb kasutada võimalikult sarnase kuju ja mõõtudega põhupakke. Viimaseid tingimusi täites on oluliselt lihtsam planeerida hoone puitsõrestiku või -karkassi paigaldust - põhupakkide ladumine on sujuvam, nõuab vähem aega ja füüsilist pingutust. Samuti on väiksem külmasildade tekkimise võimalus ning seinas olev põhk on tihedam ning soojapidavam. (Corum, Goodall 2005: 38)

Hoone püstitamiseks kulub kindel arv põhupakke. Siiski tuleks planeeritava koguse arvutamisel arvestada lisapakkide vajadusega. Esiteks on tegemist suhteliselt pehme ja kergesti deformeeruva materjaliga, mille struktuur võib saada kahjustada transportimise käigus. Teiseks tuleb arvestada ehitamisprotsessi ajal tehtavate vigade ja ettenägematute tööde tarbeks kuluvate pakkidega. Seega on soovituslik kogus 15 protsenti enam, kui seina soojustamiseks arvestuslikult kuluv pakkide arv. (Corum, Goodall 2005: 38)

### **1.2.3 Põhupakkide mõõtmed**

Põhupakke toodetakse erinevates mõõtudes. Lisaks gabariitidele on oluline ka paki tihedus. Keskmise tihedusega toodetav põhupakk on vahemikus 80-120 kg/m<sup>3</sup>, alla 80 kg/m<sup>3</sup> tihedusega pakk ehitamiseks ei kõlba (Minke, Mahlke 2005). Põhupakkide täpsed mõõdud sõltuvad pakkimismasinast, margist, tüübist ja etteantava materjali kogusest. Tabelis 2 on toodud enamlevinud põhupakkide mõõdud.

**Tabel 2.** Enamlevinud põhupakkide mõõdud (Minke, Mahlke 2005)

Tüüp	Pikkus [mm]	Laius [mm]	Kõrgus [mm]	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]
Väikesed põhupakid	500-1000	500	320-350	80-120
Keskmised põhupakid	700-2400	800	500	120-180
Jumbo põhupakid	1000-3000	1200	700	180-200

Tulenevalt pakkimismasinast on Eestis enamlevinud väikepõhupakkide mõõtmed (650-900)x(450-500)x(350-400) mm.

## 1.3 Põhupakkide ehitusfüüsikalised omadused

### 1.3.1 Soojusjuhtivus

Põhupakkidest seinad on soojapidavad, mis on tingitud antud materjali madalast soojusjuhtivusest. Ehitusmaterjali soojusjuhtivus määratakse soojuserijuhtivuse ( $\lambda$ ) kaudu - mida suurem on soojuserijuhtivuse väärtus, seda kiiremini liigub soojus läbi konstruktsiooni. Kvaliteet sõltub omakorda põhu liigist, pakke tihedusest, materjali niiskusesisaldusest ja kõrre suunast seinas. Erinevate testide käigus on katsetatud pakke nii risti kui paralleelselt soojusülekanne suunaga. Kandvate puittarindusega ehitustehnoloogiatega on võimalik valida, kas põhupakid laduda serviti, kus kõrred on risti soojusülekandega või lapiti, kus kõrred on paralleelselt soojusülekandega. (Minke, Mahlke 2005)

Kirjanduses leidub palju erinevatel aegadel ja tingimustel teostatud ehitusfüüsikalisi katseid (Minke, Mahlke 2005). Sealhulgas on mõõdetud ka katsekehade abil põhupakkide soojuserijuhtivust ning -läbivust. Katsete tulemused sõltuvad suuresti põhupakkide tihedusest, nende tingimustest, kõrre suunast ning niiskusesisaldusest (Sealsamas). Kuna põhupakkide tihedus sõltub pakkimismasinast ja tehtava protsessi tingimustest, on sellest tulenevalt katsekehade tihedus erinevates testides märkimisväärselt erinev (tabel 3) (Costes *et al.* 2017: 1). Põhupakid on gabariitidelt märgatavalt suuremad, kui ehituses kasutatavad tavapäraseid isolatsioonimaterjalid. Testide läbiviimiseks on katsekehade mõõdud viidud vastavusse mõõteriistade nõuetega (Sealsamas: 2).

Tabelis 3 on esitatud erinevatel tingimustel ja paigaldamise viisidel tehtud katsete tulemused. Välja on toodud ka Saksamaa Ehitustehnoloogia Instituudis (DIB) läbiviidud

uurimused, mille tulemused on rahvusvaheliselt enim kasutuses (Costes *et al.* 2017: 3). Soojuserijuhtivuse määramisviisi ei olnud antud katsete puhul täpsustatud.

**Tabel 3.** Põhupakkide soojuserijuhtivus erinevate allikate põhjal (Costes *et al.* 2017: 3).

Artikli refereering	Tihedus ( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	Kõrre suund	Soojuserijuhtivus ( $\lambda$ ) [W/mK]
McCabe, 1993	130	risti	0.049
		paralleelne	0.061
Andersen, 2001	75	risti	0.052
	75	paralleelne	0.056
	90	risti	0.056
	90	paralleelne	0.060
Shea, 2013	63	pole kindlat suunda	0.059
	76		0.062
	85		0.062
	107		0.064
	114		0.064
	123		0.064
Fasba, 2003	90-110	risti	0.045
Douzane, 2016	80	risti	0.051
	80	paralleelne	0.072
Conti, 2016	75	paralleelne	0.066
Grelat, 2004	77	paralleelne	0.066
DIBt, 2006	90-110	risti	0.052
		paralleelne	0.080

Tabeli 3 andmete põhjal võib järeldada, et põhupakkide soojusisolatsioonivõime on seotud nii pakkide tiheduse kui ladumise viisiga. Põhupakkidel, mille kõrred asuvad soojusülekanega risti, on soojuserijuhtivusetegur ( $\lambda$ ) väiksem kui paralleelselt laotud põhupakkidel.

Erinevate katsete tulemusena leiti, et väiksema tihedusega põhupakid on väiksema soojustakistusega (Costes *et al.* 2017: 14). Arvutused ja testid näitavad, et põhupakkidest piirete soojuserijuhtivust ja soojusläbivust on võimalik parandada põhupakkide tiheduse arvelt. Põhupakkidest ~550 mm paksusega välispiirde, mille keskmine tihedus on 100 kg/m<sup>3</sup>, arvutuslik soojusläbivus jääb vahemikku 0,15-0,20 W/m<sup>2</sup>K, sõltuvalt viimistluse ja paigalduse kvaliteedist. Antud tulemust võib pidada väga heaks, arvestades asjaoluga, et põhupakkide tootmine ja tarnimine on oluliselt keskkonnasäästlikum, kui keskmise

ehituseks kasutatava materjali puhul (Sealsamas: 14). Tabelis 4 on esitatud põhupakkidest soojustusega krohvitud seintele teostatud U-arvu testide tulemused. Põhupaki laius paralleelse kõrre suuna paigutusega oli 450 mm ja risti kõrre suunaga 360 mm (Carfrae 2011: 42).

**Tabel 4.** Väikepõhupakkidest seintele teostatud U-arvu testide tulemused (Carfrae 2011: 42)

Uurimus	Aasta	Protseduur	Kõrre suund	U-arv [W/m <sup>2</sup> K]
1	1995	Soojusvoo monitooring	paralleelne	0.21
2	1996	„Guarded hot box" meetod kogu seinale, ASTM C236	paralleelne	0,32
3	1997	„Guarded hot box" meetod kogu seinale, ASTM C236	paralleelne	0.26
			risti	0,19
4	1998	„Guarded hot box“ meetod kogu seinale, ASTM C236	paralleelne	0.21
5	2001	„Guarded hot box“ meetod kogu seinale, ASTM C236	paralleelne	0.22
			risti	0,19

### 1.3.2 Niiskus põhuehitises

Põhk on hügrokoopne ehitusmaterjal, s.t seda, et põhu kiud on suutelised siduma õhuniiskust ümbritsevast keskkonnast. Poorne põhk on võimeline niiskust liigutama vedelas ja gaasilises olekus ning selle põhilised liikumisviisid on (Kalamees: 39):

- „vee valgumine raskusjõu mõjul“;
- „vee kapillaarne liikumine“;
- „veeauru konvektsioon“;
- „veeauru difusioon“.

Üldehituses on rakenduses lihtsad põhitõed, mil viisil kaitsa seinakonstruktsiooni märgumast. Samad reeglid kehtivad ka põhuehitiste puhul. Piirdekonstruktsioonil peab olema piisav: aurutõke, õhutõke ja tuuletõke. (Kalamees: 39)

Niiskuse sisalduse kasv põhuseinas ei avalda nii suurt mõju, kui seda on tavapärase isolatsioonimaterjali puhul. Bauer (2000) andmete põhjal kasvab niiskusesisalduse suurenemisel põhuseina soojusjuhtivus 1 kuni 7 protsenti (Minke, Mahlke 2005).



### 1.3.3 Veeaurutihedus

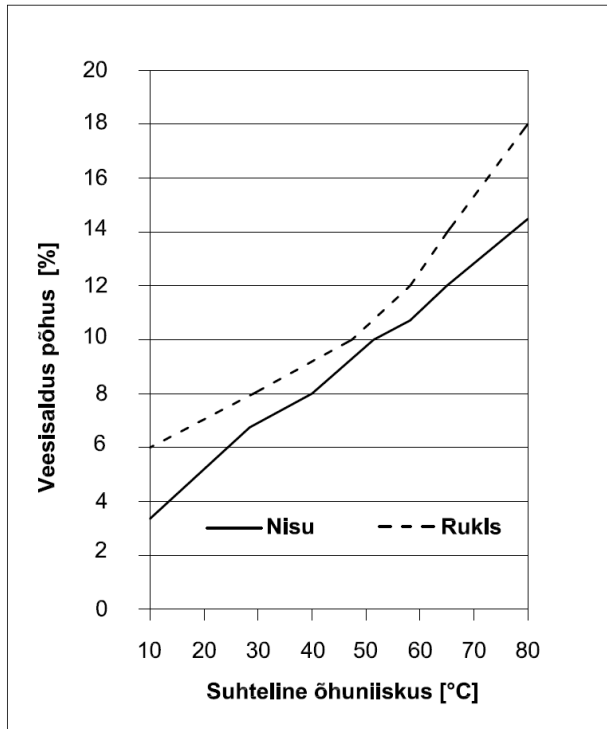
Siseruumi veeuru liikumine välisruumi läbi piirdetarindi toimub difusiooni teel. Selline nähtus tekib õhu veeaurusisalduse erinevuse tõttu piirdekonstruksiooni sise- ja väliskihis (Kalamees: 39). Meie kliimas on enamasti siseruumide veeaurusisaldus suurem kui välisõhus (suvel võib esineda ka vastupidiseid olukordi), mistõttu on difusiooni suund enamasti suunaga seest välja (Sealsamas: 39). Piirdetarindi materjali veeauru läbivuse vastupanu nimetatakse difusioonitakistuseks ehk materjali aurutakistuseks, mis sõltub võrdeliselt materjali kihi paksusest ( $d$ ) ja pöördvõrdeliselt materjali aurueri juhtivusest ( $\delta$ ) (Minke, Mahlke 2005). Põhu veeauru difusioonitakistustegur on umbkaudu 2,5. Õhu difusioonitakistustegur veeauru suhtes võrdub 1-ga. Veeaurujuhtivus sõltub veel lisaks materjali poorsusest, temperatuurist ning õhu suhtelisest niiskusest. (Sealsamas)

Põhupakkidest hoone puhul on oluline, et ehitamise ning ka eksploatatsiooni käigus saaks sein konstruktsioonis difundeeruv veeaur välja kuivada. Soojapidav piire toimib tingimusel, kui seda läbiv niiskus ei kondenseeru konstruktsioonis, vaid aurustub väliskeskkonda. Üheks võimaluseks on madala difusioonitakistusteguriga materjali kasutamine seinte töötlemiseks. Enamasti viimistletakse siseruume savi- ( $\mu = 6-8$ ) ning väliskihti lubikrohviga ( $\mu=10$ ). Viimase takistustegur on kõrgem, kuid oluliselt vastupidavam välistingimuste mõjule. Tähtis on teada, et põhust välisseina ei tohi katta materjaliga, millel on kõrge difusioonitakistustegur. Seda tehes on oht kondensaatvee tekkimiseks põhu ja viimistluskihi vahele. Samuti on põhupakkidest laotud sein hea veeauru läbitavusega. Selline konstruktsioon ei vaja sisemist aurutõkkekihti. Kõrgeim kondensaatvee tekke oht on talvel, mis on tingitud sise- ja välistemperatuuride erinevusest. Niiskusesisaldus põhuseinas peab jääma alla 15 protsendi - sellisel juhul kaob niiskus seinast suhteliselt kiiresti ning väheneb hallituse tekkimise risk. (Minke, Mahlke 2005)

### 1.3.4 Sorptsioonniiskus

Põhu niiskusesisaldus sõltub kogu ümbritsevast keskkonnast, sealhulgas temperatuurist ja õhuniiskusest (Masso *et al.* 2014: 151). Õhu veeaurusisalduse kasvuga suureneb ka põhu niiskuse sisaldus ning vastupidi – niiskuse kahanemisel põhk kuivab. Materjali niiskus oleneb õhu suhtelisest niiskusest. Sellist protsessi nimetatakse sorptsiooniks (Sealsamas: 151). Antud tegurite mõjul tekkivat niiskuse kasvu põhus nimetatakse adsorptsiooniks ning

vastupidisel juhul desorptsiooniks (Minke, Mahlke 2005). Materjali protsentuaalne veesisaldus on üldiselt esitatud massi järgi, mis leitakse materjalis sisalduva vee ja materjali kuivkaalu suhtena (Sealsamas). Joonisel 3 on graafiliselt esitatud nisu- ja rukkipõhu sorptsioonikõverad.



**Joonis 3.** Nisupõhu (25°C juures) ja rukkipõhu (21 °C juures) sorptsioonikõverad (Minke, Mahlke 2004)

### 1.3.5 Tulekindlus

Ehitisele esitatavate tuleohutusnõuete abil väljendatakse ehitise kandekonstruktsioonide ja tuletõkkeseptsioonide tulepüsivust minutites - vastavalt 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180 või 240 minutit. Tulepüsivus minutites näitab ehitise konstruktsioonivõimet säilitada ettenähtud terviklikkus ning kande- ja isolatsioonivõime. (RT I, 4 2015)

Austrias läbiviidud katse näitel on tõestatud, et puidust karkassiga põhusein, mis on väljast viimistletud lubikrohviga ning seest savikrohviga, saavutas tulekindluse hindeks F90 ehk 90 minutilise vastupidavuse. (Minke, Mahlke 2005). Tabelis 5 on esitatud põhupakkidest seintele teostatud tulekindlustestide tulemused.

**Tabel 5.** Põhupakkidest seinte tulekindluse testidest tulemused (Theis, King 2006 ref Carfrae 2011: 46)

Algataja	Aasta	Asukoht	Standard	Seina tüüp	Testi kestvus [min]	Tulemus
SHB Agra	1993	Scandia, New-Mexico	ASTME E-119	Krohvimata	30	Läbinud
				Krohvitud	120	Läbinud
California Ülikool	1996	California	ASTME E-119	Krohvitud	60	Läbinud
GrAT Wein	2001	Viin, Austria	Saksa F90	Krohvitud	90	Läbinud
Santa Fe Tuletõrje	2000	Uus-Mehhiko	1093°C	Krohvimata	30	Ebaõnnestus
				Puitkarkassist sein	35	Põlenud
				Krohvitud	40	Läbinud
Taani Tule ja Turvalisuse Instituut	2001		1000°C	Avatud karkassiga krohvitud sein	30	Läbinud (ainult 1°C tõus ilmutamata poolel)
AUSBALE	2002	Austraalia	Austraalia Bushfire kood AS 3959	Krohvitud	Teadmata	Kvalifitseeritud tulekindel, Läbinud
DCAT	2006	Texas	ASTME E-119	Maa krohv	60	Läbinud
				Lubi/tsementkrohv	120	Läbinud

Vastava tabeli põhjal on näha, et krohvitud põhuseinad on võimelised säilitama etteantud terviklikust. Põhuseina tulepüsivuse aeg sõltub viimistlemisel kasutatud materjali vastupanu võimest. Katmata põhk on kergesti süttiv, seega on oluline teostada põhupakkidest tarindite viimistlustööd lubi- või savikrohviga võimalikult varakult, et tagada konstruktsiooni tuleohutus ning vastupanuvõime tulele.

## **2. KANDVA PUITTARINDUSEGA PÕHUPAKKIDEST SOOJUSTUSEGA HOONETE EHITAMISE TEHNOLOOGIA**

Kandva puittarindusega põhupakkidest soojustusega hoonete puhul kannab vahelagede ja katuse koormust puitsõrestik või -karkass, mis on ühtlasi hoone tugistruktuuriks. Kandev puittarind peab olema piisava kandevõimega ja omama piisavat stabiilsust horisontaalsete ja vertikaalsete koormuste suhtes. Hoone soojustamiseks kasutatavad põhupakid ei kuulu ehitise kandekonstruktsiooni hulka ning ei osale vertikaalsete koormuste vastu võtmisel.

Sõltuvalt puittarinduse lahendusest on põhumajade ehitamisel kasutatud põhupakke aga jäikuselementidena hoonete mõjuvate horisontaalsete koormuste vastuvõtmiseks. Sellisel juhul ei täida põhupakid enam mitte üksnes soojustuse rolli, vaid võtavad osa ka ehitise tugikonstruktsioonist. (Hodge 2006)

Kandvate puittarinduste paigutus ning põhupakkide asetus nende suhtes võivad olla vägagi erinevad. Mõningaid lahendusi kasutatakse sagedamini, aga kokkuvõttes pole ükski lahendus halvem kui teised. Enamasti sõltub kõik konkreetsest objektist ning soovitud lõpptulemusest. (Lacinski, Bergeron 2000: 156-157)

Suures plaanis võib eristada kahte erinevat kandva puittarindusega põhumajade ehitamise tehnoloogiat.

**Põhupakkide sisse pakitud kandekonstruktsioon „The Bale Wrapping System“** – Antud meetodiga planeeritavatel ja ehitatavatel hoonetel on tugev massiivne puidust tugikonstruktsioon ning põhupakid paigaldatakse ümber kandvast puitkonstruktsioonist väljapoole. Seoses sellega jääb puitraamistik osaliselt või täielikult siseruumides nähtavale kohale ning on jälgitav ja kaitstud ilmastiku mõjude eest. (Lacinski, Bergeron 2000: 158)

**Põhupakkidest täitega kandekonstruktsioon „The Infill Method“** – Sellise lahenduse puhul paigaldatakse põhupakid puidust kandekonstruktsioonide vahele, kus kandev puitkonstruktsioon jääb põhupakkide sisse ning on piirdetarindites seest- ja väljastpoolt täielikult kaetud põhupakkide ja viimistlusmaterjalidega. (Lacinski, Bergeron 2000: 158)

Lisaks ülalnimetatud meetoditele on veel palju erinevaid kombineeritud lahendusi ning konkreetsele ehitisele sobivaima leidmine on juba tellija, ehitaja ning projekterija ühine otsus. (Lacinski, Bergeron 2000: 157)

## **2.1 Vundamendid ja põrandad**

Detailsed nõuded ehitiste ja rajatiste geotehnilise osa projekteerimiseks Eestis annab standard EVS-EN 1997-1:2006, mis käsitleb ehitise tugevuse, püsivuse, kasutuskõlblikkuse ja kestvuse nõudeid. Ehitusfüüsikalisi nõudeid, näiteks soojus- ja heliisolatsiooni kohta, antud standard ei käsitle. (EVS-EN 1997-1:2006)

Vundamendi ülesandeks on kõikide ehitiste puhul koormuste ülekandmine pinnasele. Vundamendilahendus ja materjalide valik sõltub rajatise või hoone eripärast ning ühtlasi ehitise asukohast kui ka pinnase karakteristikutest. Põhupakkidest soojustusega kandva puittarindusega hoone ehitamiseks tuleb vundamendi valikul lähtuda samadest kriteeriumitest, mis traditsioonilise mineraalvillaga soojustatud puitkarkassist või puitsõrestikust hoone planeerimisel. Erilist tähelepanu vundamendi lahenduse valikul vajab veel välistarindite kaitse sademete ja pinnaseniiskuse eest. Enamlevinud väikemajade vundamendid on: lintvundamendid, postvundamendid ja plaatvundamendid.

Külmades kliimatingimustest ehitatavate hoonete vundamendi lahenduse valikul tuleb ühtlasi arvestada maapinna läbikülmumisega ning seoses sellega ka pinnase külmakergetega, mis igal talvel aset leiavad. Külmunud pinnase ebaühtlane kerkimine ja pinnase vajumine üles sulamisel põhjustab mõrasid nii vundamendi kui seintekonstruktsioonides ning tekitab probleeme äravajunud uste ja akende avamisel ja sulgemisel. Seega väikese eelarvega ja lihtsa lahendusega põhumajadele ehitatud vundamendid külmades kliimatingimustes ei ole tavaliselt kõige sobilikumad. (Lacinski, Bergeron 2000: 87)

Kõikide põhupakkidest hoonete ehitamisel tuleb tähelepanu pöörata piisavale sokli kõrgusele (soovituslik kõrgus ~500 mm), et kaitsta välisseinu maapinnalt pritsivate sademete ja pinnaseniiskuse eest. (Amazon Nails 2001: 20)

Vundamendi ja põhupakkide esimese rea vahele tuleks paigaldada puitlattidest sisemine ja välimine müürilatt, mis kinnitatakse sobivate ankrutega vundamendi või sobivate

kinnitusvahenditega kandepõranda külge. Müürilattidele asetatakse põhupakid ning müürilattide vaheline osa tuleks täita soojapidava ning niiskust läbilaskva materjaliga. (Magwood *et al.* 2005: 177-178)



**Joonis 4.** Vundamendi ja põhupakkide esimese rea vahelised müürilattid ning nende vahel paiknev soojustus koos selle all asuva hüdroisolatsiooniga (Magwood *et al.* 2005: 178)

Kapillaarniiskuse tõkestamiseks tuleb puidust ja põhust konstruktsioon eraldada kivitarinditest hüdroisolatsiooniga, milleks on kõige sobilikum 2 – 4mm paksune SBS bituumenrullmaterjal.

Müürilattide vahelise osa täiteks võib kasutada ka kergkruusa, mis on loodussõbralik, mahupüsiv ning külmakindel täite- ja soojustusmaterjal.

Sõltuvalt hoone ehituseks kasutatavate põhupakkide mõõtmetest võib alumiste müürilattidena kasutada puitprusse mõõtmetega 50 x 100 mm või 50 x 150 mm. Kasutatav puit peab olema kindlasti kuiv (niiskussisaldus < 15%) ning ei tohi esineda puidusinetust. Prussikute vahe ja paigaldamise laius peab sobima neile toetuvate põhupakkide aluslaiusega.

Vundament ei pea olema täpselt sama lai, kui on sellele toetatud põhupakid. Sellega tagatakse hilisemas ehitusfaasis põhupakkidest seina siledamaks töötlemisel vundamendi või müürilattide ning nendele toetuvate seinapostide sobivus. Ühtlasi ei ole vundamenti

soovitav ehitada seintest laiem, kuna siis võib vihmavesi jääda vundamendile pidama ning hakata märgama esimese rea põhupakke. (Amazon Nails 2001: 26)

Põranda võib ehitada pinnasele toetuvana või alt tuulutatava kandva põrandana. Pinnasele toetuva põranda puhul koormatakse vundamenti vaid seinatarinditelt ülekantava koormusega. Alt tuulutatava kandva põranda puhul on puittarinditest põrandakonstruktsioonid hästi kaitstud seene- ja pehkimiskahjustuste eest. (Keppo 2004)

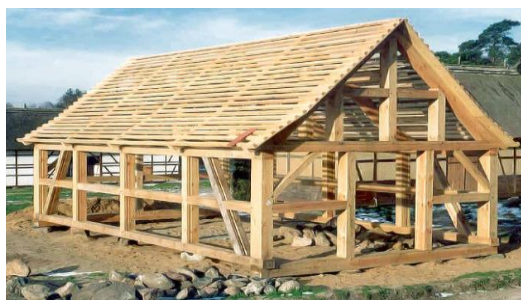
## 2.2 Seinad

Põhupakkidest soojustusega kandva puittarindusega hooneid võib ehitada karkasstarindiga seintena (variant a) või sõrestiktarindiga „Fachwerk“ seintena (variant b) (joonis 5).

a)



b)



**Joonis 5.** Kandva puittarinduse seinad a) karkasstarindiga sein ([www.alusehitus.ee](http://www.alusehitus.ee)) b) sõrestiktarindiga sein (<https://de.pinterest.com>)

Mõlema tarindiga lahenduse puhul on tegemist post-tala süsteemiga, kus põhimõtteline erinevus tuleb puittarindi seinte ehitamisel kasutatavate materjalide ristlõigete erinevusest. Sõrestiktarindiga (joonis 7) seinte ehitamisel on puitpostid ja –talad suurema ristlõikega ning seetõttu nende paigalduse samm on ka väiksem. Karkasstarindiga (joonis 6) seinte ehitamisel on puitpostid ja –talad väiksema ristlõikega ning seetõttu nende paigalduse samm on tihedam.

Karkass- ja sõrestiktarindiga ehitiste puhul, kus soojustusena kasutatakse põhupakke on tegemist postide ja talade süsteemiga, kus vahelaed toetuvad vahevöötaladele ning katusesõrestik toetub ülemisele vöötalale. Sõrestik võtab vastu seintest, vahelagedest ja katuselt tuleva koormuse ning kannab selle üle vundamendile. Traditsiooniliselt on selliste sõrestike ehitamiseks kasutatud puitu. Sõrestiku horisontaalne stabiilsus tagatakse sageli

terasest või puidust põik- ja ristsidemetega. Samas on ehitatud kuni kahekorruselisi põhupakkidest soojustusega hooneid, kus horisontaalne stabiilsus tagatakse ainult põhupakkidega, mis asetsevad tihedalt karkassipostide vahel. (Hodge 2006: 49-51)



**Joonis 6.** Põhupakkidest soojustusega puitkarkasstarindiga hoone, kus horisontaalse stabiilsuse tagamiseks on kasutatud puidust elemente

Kui põhupakkidest ühekorruseliste hoonete ehitamisel on kasutatud erinevaid (Nebraska stiil, puidust raamistik ja kandva puitkarkassiga seinad) põhumajade ehitamise tehnoloogiaid, siis kahekorruselised hooned ehitatakse traditsiooniliselt kandva karkass- või sõrestiktarindina (Hodge 2006). Põhupakkidest hoonete ehitamine sõrestik- või karkasstarindina on eelistatud just enamike arhitektide ja ehitusinseneride seas, kuna tugineb tavalise kandva puittarindiga hoone projekteerimise ja ehitamise ehitustehnilistel teadmistel (Amazon Nails 2001: 10). Sellise lahendusega seinakonstruktsioonide ehitamisel kulub tavaliselt ehituspuitu rohkem kui puidust raamistikuga või Nebraska stiilis ehitatavate hoonete puhul (Sealsamas: 10). Samas enamlevinud arvamus, et kandva puittarindiga hoonete ehitamisel on puidu kulu ja seega ka maksumus suurem kui Nebraska või kerge raamistikuga stiilis ehitatavad põhumajad, ei pea alati paika (Lacinski, Bergeron 2000: 157). Kõik sõltub kavandatava hoone puidust tarindi paigutusest ja materjalidest. Kuna puidu survetugevus on küllaltki suur, siis korraliku planeerimise ja mõistliku paigutusega võib kandva puittarindusega põhumaja ehituseks puitmaterjali kulu olla võrdne teiste põhumajade ehitustehnoloogiatega ehitamisel (Sealsamas: 157).





**Joonis 7.** Põhupakkidest soojustusega puitsõrestiktarindiga hoone, kus horisontaalse jäikuse tagamiseks on kasutatud terassidemeid ([www.fibertec.com](http://www.fibertec.com))

Nii nagu kõikide kandvate seintega puittarindusega hoonete kavandamisel, tuleb põhupakkidest soojustusega ehitiste planeerimisel dimensioneerida eelnevalt teostatud tugevus- ja stabiilsusarvutustega kasutatava ehituspuidu mõõtmed, tugevusklass ja asetus ning ühtlasi kinnitustarvikud ja nende paigutus.

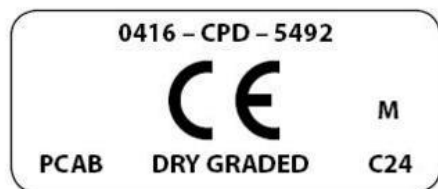
Kandekonstruktsioonides kasutatavad saepuidust puitelemendid peavad vastama standardile EN 14081-1 ning ümarristlõikega puitelemendid standardile EN 14544. Puidu tugevusklassid määratakse vastavalt standardile EN 338. Metallkinnituselemendid peavad vastama standardile EN 14592 ning metalltüüblid omakorda standardile EN 14545. (EVS-EN 1995-1-1:2007)

Eestis müüdavast saepuidust (monoliitpuidust) tugevussorteeritud ehituspuiduna on enamlevinud okaspuit tugevusklassiga C24, kus täht „C“ tähistab Euroopa Liidu liikmesriikide ühtset tugevusklassi markeeringut ja number „24“ paindetugevuse normväärtust ( $f_{m,k}=24 \text{ N/mm}^2$ ). Antud tugevusklassiga okaspuit sobib enamike puitsõrestik- ja puitkarkasshoonete seinte ehitamiseks.

Kandekonstruktsioonis kasutatavale ehituspuidule peab olema peale märgitud (joonis 8) ([www.puumerkki.fi](http://www.puumerkki.fi)):

- tugevusklass;
- puiduliik;
- kuivatusmeetod;
- tugevussorteerimise standard;

- tootja identifitseerimiskood;
- sertifitseerimisfirma identifitseerimiskood;
- CE – märgistus.

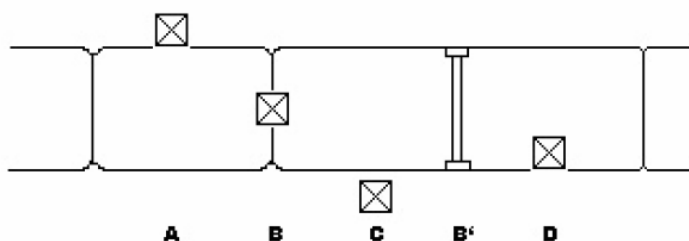


**Joonis 8.** Tugevussorteeritud puidu markeering ([www.puumerkki.fi](http://www.puumerkki.fi))

Lihtsamate 1-2 korruseliste hoone seinte ehituseks võib kasutada puitu, mis ei ole küll tugevussorteeritud, aga on kuiv (puidu niiskussisaldus  $< 15\%$ ) ja ei tohi esineda puidusinetust. Sellise puidu kasutamine eeldab aga ehitustöid teostava meistrimähe head silma ja eelnevat kogemust konstruktsiooni paigaldatava puitmaterjali valimisel ning sorteerimisel.

Põhupakkidest soojustusega kandva puittarindusega hoonete seinakonstruktsioonide ehitusel on soovitatav puitpostide paigaldamise planeerimisel arvestada soojustuseks kasutatavate põhupakkide mõõtmetega. Puitpostide üldlevinuimad paigutused seinas võivad olla järgmised (joonis 9) (Minke, Mahlke 2004):

- põhupakkidest seinast väljaspool;
- põhupakkidest seina keskel;
- põhupakkidest seina sise-ja välisküljel paralleelselt sõrestikuna;
- põhupakkidest seinast täielikult seespool;
- põhupakkidest seina siseküljel.



**Joonis 9.** Puitpostide enamlevinuimad paigutusviisid põhupakkidest seinas (Minke, Mahlke 2004)

Paigutades puitpostid vastavalt variantidele A ja C, pole laotavate põhupakkide ja postide paiknemise vahel olulist seost. Pakkide pikkusega võiks arvestada akna- ja ukseavade paigutuse planeerimisel. Kui paigutada puitpostid vastavalt variandile B, siis tuleneb karkassipostide samm põhupakkide pikkusest. Sama tingimus kehtib ka variandi B' puhul, kus puitkarkassi paigaldusel tuleb lähtuda soojustuseks kasutatavate põhupakkide pikkustest, sest põhupakid peavad sobituma tihedalt nende vahele. Antud variandi puhul on võimalik kasutada kandvat puittarindust sise- ja välisviimistluseks kasutatavate viimistlusmaterjalide kinnitamiseks. Kui puitpostid planeerida variandi D kohaselt, siis väheneb ehitatava seina paksus ning on ühtlasi võimalik sisepiirdel paiknevaid tugiposte kasutada ka raskemate elementide (köögimööbli) kinnitamiseks. Põhupakkidest ehitamisel ei pruugi kõik pakid olla ühesuguste mõõtudega ning eriti võib erineda põhupakkide pikkus. Sellisel juhul on kõige sobilikum kasutada variandi A või C puitpostide paigutust. Kui põhupakid ei asetse tihedalt puittarindi postide vahel, siis pakkide ladumisel tuleb kindlasti kasutada „plokk-seotist“ ning vältida järgnevate ridade vertikaalvuukide kohakuti sattumist. (Minke, Mahlke 2004)

Samas võib puitkarkasstarindiga seinakonstruktsioonides puitpostid paigutada üherealiselt põhupakkide sisse ja välispinnaga paralleelselt. Sellise paigutusega puitpostid asetatakse välimisele müürilatile ning paigutatavate puitpostide mõõtmed sõltuvad paigalduse tihedusest ehk põhupakkide pikkusest ja kandetarinditele mõjuvatest koormustest.

Eestis kasutatavate põhupakkide enamlevinumad pikkused jäävad vahemikku 600...900 mm. Seega tuleks puidust kandepostide paigalduse sammuks planeerida 600...900 mm. Ukse- või aknaavade ehitamisel võib puitpostid paigutada põhupakkide sisse kaherealiselt seina sisse– kui ka välisküljele paralleelselt. Sellisel juhul on võimalik hilisemas faasis ukse- ja aknapõsed viimistleda erinevate võimalustega ning aknalaudade paigaldamisel on vajalik raamistik juba olemas.

Karkass– või sõrestiktarindiga seina konstruktsioon projekteeritakse ja ehitatakse Eestis enamasti hoonete puhul C24 okaspuidust prussikutest. Dekoratiivsel eesmärgil võib puittarindite ehitamisel kasutada ka ümarpuitu. Ümarpuitu kasutatakse puitkonstruktsioonides just sellistes kohtades, kus puittarind jääb konstruktsioonist välja nähtavale kohale ja täidab sisekujunduses disainielemendi rolli. Põhupakkidega

soojustatud ühekorruselise puitkarkasshoone ehitamisel võib puitpostidena kasutada C24 prussikuid 45 x 95 mm ja 95 x 95 mm või kuiva tugevussorteerimata okaspuitu mõõtmetega 50 x 100 mm ja 100 x 100 mm. Põhupakkidega soojustatud kahekorruselise puitkarkasshoone ehitamisel võib puitpostidena kasutada C24 prusse 45 x 145 mm ja 145 x 145 mm või kuiva tugevussorteerimata okaspuitu mõõtmetega 50 x 150 mm ja 145 x 145 mm.

Kuni kahekorruseliste põhupakkidest soojustusega hoonete puittarindusega seinte ehitamisel võib kasutada „balloonsõrestiku“ (balloon frame) või „platvormraami“ (platform frame) meetodit.

**Balloonsõrestike karkassiga ehitamisel** paigaldatakse läbi kahe korruse pikad puidust kandepostid ning läbi vahevöötugitalade toetatakse nendele nii sarikad kui ka vahelaetalad. (Siikanen 2012)

**Platvormraamist karkassiga ehitamisel** kasutatakse eelnevalt korruse kõrguse järgi mõõtu lõigatud puitposte ning nendele toetatud vahelaetalad on järgmise korruse ehitamisel aluspõrandaks. (Siikanen 2012)

Enne ehitustöödega alustamist ning puidust kandekonstruktsiooni paigaldamist on soovitatav ehitamiseks vaja minevate põhupakkide eelnev varumine ja kohalolu ehitusplatsil või selleks mõeldud ladustamiskohas (Magwood *et al.* 2005: 181). Pärast hoone puidust kandekonstruktsiooni valmimist tuleb enne põhupakkide seina paigaldust eelnevalt teostada ukse- ja akanaavade ettevalmistustööd. Selline järjestus säästab olulisel määral ehitustööde teostamiseks kuluvat aega (Sealsamas: 181). Ehitusprotsessi lihtsustamiseks ja kiirendamiseks on avade suuruste ja paiknemise planeerimisel kindlasti soovitatav arvestada põhupakkide mõõtmetega (Corum, Goodall 2005). Põhupakkide paigaldamisel seina ei tohi liigselt kiirustada - vastasel juhul unustatakse ära mõni oluline ehituslik vaheetapp ning selle tulemusel võib valminud seinte kvaliteet oluliselt kannatada saada (Magwood *et al.* 2005: 185). Põhupakkide seina paigaldamine on küllaltki loominguline tegevus, kus rida realt ning tööde edenedes leiab igaüks ise just temale sobivaima lahenduse põhupakkide seina asetamiseks (Sealsamas: 185). Kõik inimesed, kes lapsepõlves on mänginud „Lego“ klotsidega, omavad ülevaadet põhupakkide seina asetamise põhimõtetest (Corum, Goodall 2005: 41).

Lisaks üldlevinud teadmistele tuleks veel silmas pidada mõnigaid aspekte ja eripärasid, mis on just nimelt seotud põhupakkide paigaldamisega (Magwood *et al.* 2005: 185-187):

- Paiguta põhupakid tihedalt üksteise peale ja kõrvale. Võid kohelda neid nagu kivi-plokke, mis seina paigaldamisel tuleb kindlalt paika sobitada.
- Mida tihedamalt ja täpsemalt põhupakkidest sein on laotud, seda stabiilsem ja soojapidavam on piire.
- Esimese ja iga järgneva rea põhupakkide paigaldamist alusta alati nurkadest ning liigu seina liini pidi nurgast sissepoole. Sellega vähendad oluliselt erimõõdus lühemaks tehtavate põhupakkide kogust ja kohakuti sattuvate lühikeste põhupakkide ridu.
- Kõik sise- ja välisnurgad tuleb siduda ridade kaupa nurgaseotisena.
- Ehitustööde teostamisel tuleb tähelepanu pöörata nii põhupakkide kui ka ehitatavate konstruktsioonide kaitsmiseks sademete eest.
- Ära unusta tuleohutusnõudeid. Eriti tuleohtlik on lahtine põhk, mis ümbritseb ehitusplatsi.
- Ära kiirusta põhupakkide paigaldusel. Lõpetatud seinte ehitusvigade parandus võtab oluliselt rohkem aega, kui mõningad mõttepausid ja kaalutletud ning läbimõeldud tegutsemine.

## 2.3 Viimistlus

Kaitse erinevate ilmastikuolude eest on põhupakkidest soojustusega hoonel sama oluline nagu igal teisel piirdetarindil. "Hingava" tarindi viimistlemisel on parim valik traditsiooniline looduslik krohv: savi- ja lubikrohv (Pere 2008). Maailmas on tuua näiteid, kus fassaad on kaetud tsementkrohviga (Amazon Nails 2001: 43-44). Eesti niiske kliima sellist lahendust ei soodusta. Tsement on veekindel materjal, mis takistab põhust konstruktsiooni niiskuse välja kuivamist. Põhk on elastne ja pehme materjal erinevalt jäigast tsementkrohvist. Aja möödudes võib tekkinud niiskus vajuda piirde alumisse ossa, mis põhjustab isolatsiooni hallitust ning lagunemist (Sealsamas: 43-44).

Järgnevalt on kirjeldatud viimistlusmaterjale, mida on kasutatud käesoleva katsemaja ehitamisel (joonis 11 ja 12).

### 2.3.1 Lubikrohv

Lubikrohv on väga hinnatud ehitusmaterjal, mida on läbi aegade ehituses rohkesti kasutatud. Lubja kõrge aluselise reaktsiooni tõttu on kasutamine võimalik nii sise- kui välistingimustes. Näiteks UNESCO maailmapärandisse kuuluva Tallinna vanalinna hooned on viimistletud just lubikrohviga. Seega võib tõdeda, et antud ehitusmaterjalil on väga hea võime vastu pidada nimelt meie kliima tingimustele ning ajale. Lihtsustatult võib jagada lubikrohvi järgmiselt (Pere 2008):

- sise- ja välistingimuste otstarbeks;
- struktuuri suuruse järgi;
- toonilt valged ja hallid;
- nakkuvuse järgi.

Lubja kivistumiseks (karboniseerumiseks) on vaja õhust süsihappegaasi ja niiskust. Lõplik kivistumine võtab aega, siseruumides võib selleks kuluda mitmeid kuid. Protsessi mõjutavad paljud tegurid, näiteks õhu temperatuur, niiskusesisaldus, tuul, päike ning aluspinna veeimavus. Kivistunud lubikrohv on hea siseruumide niiskuse tasakaalustaja, mis puhastab õhku ning lisab põhust seintele tulekindlust. (Pere 2008)

Traditsiooniline lubimördi koostis jaguneb võrdselt sideainete ja täitematerjalide vahel. Täitematerjaliks on tavaliselt liiv ja väikese struktuuriga kruus (Rand 2004: 1-2). Sideaine koosneb omakorda täitelubjast (38%) ning sideainelubjast (12%). Suurema osa sideainest moodustab peenestatud lubjakivi ning väiksem osa põletatud lubi (Sealsamas: 1-2). Ilmastikukindluse tagamiseks lisatakse mördi koostisesse peenestatud tellist, raualisandit või tsementi (Pere 2008). Tänapäeval on võimalik osta erinevate tootjate poolt juba valmis segatuna kuivsegu. Vastavalt soovile ja tingimustele on võimalik valida traditsioonilise või erinevate lisanditega segatud krohvide vahel. Näiteks pakutakse välistingimusteks sobivat lubikrohvi, mille vastupidavuse tõstmiseks on lisatud armeerimiskiudu ning tsementi.

Enne krohvimise alustamist tuleb veenduda, et paigaldatud pakid oleksid võimalikult tihedalt üksteise peale laotud. Pakkide vahelised tühimikud tuleb täita lahtise põhuga ning seinast väljaulatuvad kōrred trimmimise teel lühemaks lõigata, kuni on saavutatud ühtlane sile tasapind. Põhuseina tasandamine vähendab oluliselt vajaminevat krohvi kogust ning tehtavat tööd (joonis 10). (Amazon Nails 2001: 40)



**Joonis 10.** Põhupakkidest soojustusega puitkarkasstarindiga hoone seina trimmimine mootorsaega STIHL MS 180

Lubikrohvi paigaldatakse kas käsitsi või krohvipritsiiga (Pere 2008). Paigaldus toimub kihtide kaupa, kihi paksus peab olema 5-15 mm. Esimene sisseviskekiht on õhuke ja võimalikult vedela konsistentsiga, millega saavutatakse võimalikult tihe ja parim nakkuvus kuiva põhuga. Krohvikihi lõplik paksus peab olema 30-50 mm. Mördi valmistamisel tuleks jälgida, et segu oleks plastiline ja piisavalt nakkuv (Sealsamas). Lubikrohv kuivab põhuseinas suhteliselt kiiresti, tingituna põhu hingava omaduse tõttu (Amazon Nails 2001: 39-41). Uue kihi paigaldamisel tuleb veenduda, et alumine kiht oleks piisavalt kivistunud. Sobivatel tingimustel on võimalik juba järgmisel päeval töödega jätkata. Krohvikihide vahelisi pindu tuleb alati niisutada, et tagada parem nakkuvus. Lisaks soodustab niisutamine süsinikdioksiidi kandumist krohvi sügavamatesse kihtidesse (Sealsamas: 39-41).

Lubikrohv on värvitav pärast lõplikku kivinemist vähemalt 14 päeva möödudes. Tööde teostamisel tuleb jälgida, et õhutemperatuur ei langeks ööpäeva jooksul miinuskraadidesse. Samuti tuleb materjali kaitsta otsese päikesevalguse eest, sest äkiline temperatuuri muutus võib kahjustada värskelt krohvitud pindu. Tööde teostamisel tuleks kasutada kaitseprille ja kindaid, sest lubimört on söövitava toimega. (Pere 2008)





*Joonis 11. Lubikrohviga viimistletud põhuseintega hoone Leigol*

### **2.3.2 Savikrohv**

Savi on üks kättesaadavamaid ning lihtsamini töödeldavaid ehitusmaterjale. Eestis laialt levinud loodusvara on heade tehniliste omadustega, mille peamisteks tunnusteks võib pidada voolitavust ja plastilisust. Savikrohv on lihtne viimistlusmaterjal, mis koosneb savist ja liivast. Just savi headele omadustele sobib materjal erinevatele pindadele, sealhulgas põhupakkidest seintele. (Akermann & Vahejõe 2011)

Toormaterjalina on savi piirkonniti erineva tooni ja struktuuriga. Tüüpiline savikrohv sisaldab 20% savi ning 80% liiva. Krohvi ilmastikukindluse tõstmiseks on läbi aegade lisatud värsket loomasõnnikut ning tugevuse ja soojapidavuse parandamiseks purustatud põhku, saepuru või linaluud. Kui on plaanis toormaterjalidest krohv ise kokku segada, tuleb arvestada, et tegemist on mahuka ja aeganõudva tööga. Aja kokkuhoidmiseks on siiski võimalik ka soetada juba valmis segatud kuivsegu. (Amazon Nails 2001: 42-43)

Savi on suurepärane siseruumide niiskuse reguleerija, hoides seda just inimesele sobivas vahemikus (50-60%). Hingava materjalina soodustab see ruumi sisekliimat. Samuti takistab antistaatiline pind tolmu levimist. (Pere 2009: 49)

Savikrohvi pinna ettevalmistamisel tuleb arvestada tingmustega nagu iga teise krohvigi puhul (Pere 2009: 53). Krohvitav aluspind peab olema kuiv, tolmuva ning puhas



lahtistest osadest. Enne alustamist tuleb aluspind niisutada, et tagada krohvi nakkumine. Üldiselt sobib savikrohv kuivade ruumide viimistlemiseks tema suhteliselt suure veekartuse tõttu (Sealsamas). Niiskete ruumide krohvimisel saab veekindla pinna tadelakti kasutades. Välisseinte viimistlemisel tuleb savikrohv katta kihtide kaupa lubjapiimaga ning jälgida, et ei esineks miinuskraade (Amazon Nails 2001: 41-42).

Põhupakkidest seinte pinna krohvimine savikrohviga toimub sarnaselt lubikrohvile. Paigaldus on võimalik nii käsitsi kui ka pritsiga (Pere 2009: 51-54). Paigaldus peaks toimuma kihtide kaupa, ebatasase pinna puhul esimene kiht paksemalt ning iga järgmine õhemalt (Sealsamas). Kihi, paksusega 20-25 mm, kuivamise ajaks võib arvestada 3-8 päeva (Pere 2008). Kuivamise protsessi on võimalik kiirendada niiskuse eristajaga, kuna savi kuivab vee väljaauramisel. Tahenemise käigus tekkinud praod on võimalik likvideerida savi pinna niisutamisel ja siludes seda krohvilauaga (Sealsamas). Krohvitud seinu võib värvida või eksponeerida värvimata kujul vastavalt valitud savi toonile. Sobivad variandid oleks kaseiinvärv, savivärv või linaõlitemperat, mis säilitavad seina hingava omaduse. (Pere 2009: 54-55)



**Joonis 12.** Savikrohviga viimistletud leiliruum Leigo talu saunahoones

### 2.3.3 Lubikrohv tadelakt

Marokost pärit dekoratiivne ja veekindel lubikrohv, nimega tadelakt, sobib ruumidesse, mis puutuvad kokku vee või kõrge temperatuuriga. Vetthülgava pinnastruktuuri tõttu kasutatakse tadelakti eelkõige pesemisruumides, kuid on sobilik ka kõrge temperatuuri talumise tõttu ahjude ja kaminade viimistlemisel. Kattepinnaks sobivad nii kivi- kui ka krohvitud seinad. Vastupidava materjali krohvimistehnika sarnaneb lubi- ja savikrohvi paigaldusviisiga. Krohvimine toimub kihtide kaupa, mida silutakse vastavalt kihile loodusliku või keraamilise kiviga. Täieliku veekindluse tagamiseks viimane kiht seebitatakse ning poleeritakse, läike lisamiseks tuleks seda töödelda vahaga. Krohvi toonimiseks lisatakse tadelakti looduslikke pigmente. (Pere 2008)



*Joonis 13. Tadelaktiga viimistletud dušinurk (foto: [www.safran.ee](http://www.safran.ee))*

### **3. PÕHUPAKKIDEST SAUNAHOONE VÄLISSEINA SOOJUS- JA NIISKUSTEHNILISE TOIMIVUSE ARVUTUSLIK KONTROLL**

Põhupakkidest soojustusega piirdetarindite soojus- ja niiskustehnilise projekteerimise peamisteks eesmärkideks on:

- tagada välispiirete piisav soojapidavus;
- tagada inimtegevuseks tervislik sisekliima;
- vältida niiskuse sattumist piiretesse;
- tagada liigniiskuse välja kuivamine piiretest;
- tagada piisav õhupidavus;
- tagada keskkonnasõbralikkus;
- tagada piirdetarindite optimaalne majanduslik maksumus.

Leigo tallu kavatseti ehitada puitkarkassist katsehoone, mille soojustamiseks plaaniti kasutada põhupakke mõõtmetega 650 x 500 x 400 mm. Põhupakkide mõõtmed määras olemasolev põhupakkide valmistamise masin „FORTSCHRITT K450“. Hoone seinad oli plaanis viimistleda väljast lubikrohviga ning seest lubi- ja savikrohviga.

Etteantud mõõtmetega põhupakkidest soojustusega puitkarkasshoone projekteerimisel kontrollisime arvutuslikult esmase lähendusena alljärgnevaid tingimusi:

- välisseinte soojusläbivust tulenevalt EV energiatõhususe miinimumnõuetest;
- kondenseerumise ja hallituse tekke vältimist.

Põhupakkidest soojustusega katsemaja piirdetarindis olevate mittehomogeensete kihtide tõttu on analüüsitav ala jaotatud kahte tsooni:

- soojustuse sektsioon (tsoon A);
- karkassipostide sektsioon (tsoon B).

#### **3.1 Mittehomogeensetest kihtidest välisseina arvutuslik soojusläbivus statsionaarsetes tigitustes**

Katsehoone piirdetarindi soojusläbivus on arvutatud vastavalt standardile „EVS-EN ISO 6946:2008“.

Antud arvutusmeetod tugineb kolmele järjestikulisele etapile:

- 1) arvutatakse piirdetarindi kogusoojustakistus  $R_T$  ( $\text{m}^2\text{K/W}$ );
- 2) arvutatakse piirdetarindi soojusläbivus  $U$  ( $\text{W/m}^2\text{K}$ );
- 3) arvutatakse piirdetarindi korrigeeritud soojusläbivus  $U_c$  ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ).

Soojuslikult mittehomogeensetest kihtidest piirdetarindi kogusoojustakistus arvutati valemiga 4.1. (EVS-EN ISO 6946:2008):

$$R_T = \frac{R_T' + R_T''}{2}, \quad (4.1.)$$

kus  $R_T$  – mittehomogeense piirde kogusoojustakistus  $\text{m}^2\text{K/W}$ ;

$R_T'$  – mittehomogeense piirde kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus  $\text{m}^2\text{K/W}$ ;

$R_T''$  – mittehomogeense piirde kogusoojustakistuse alumine piirväärtus  $\text{m}^2\text{K/W}$ .

Mittehomogeense piirde kogusoojustakistuse ülemise piirväärtuse arvutamisel vaadeldakse piirde pinnaga risti olevaid sektsioone ning arvutatakse valemiga 4.2. (EVS-EN ISO 6946:2008):

$$R_T' = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_{Ta}} + \frac{A_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{R_{Tn}}}, \quad (4.2.)$$

kus  $R_T'$  – mittehomogeense piirde kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus  $\text{m}^2\text{K/W}$ ;

$A_a, A_b, \dots A_n$  – piirde erinevate tsoonide a, b, ... n ala pindalad  $\text{m}^2$ ;

$R_{Ta}, R_{Tb}, \dots R_{Tn}$  – piirde erinevate tsoonide a, b, ... n sektsiooni soojustakistus  $\text{m}^2\text{K/W}$ .

Piirde erinevate tsoonide sektsiooni soojustakistus arvutatakse valemiga 4.3. (EVS-EN ISO 6946:2008):

$$R_{T(a,b,\dots,n)} = R_{Si} + \frac{d_{1(a,b,\dots,n)}}{\lambda_{1(a,b,\dots,n)}} + \frac{d_{2(a,b,\dots,n)}}{\lambda_{2(a,b,\dots,n)}} + \dots + \frac{d_{n(a,b,\dots,n)}}{\lambda_{n(a,b,\dots,n)}} + R_{Se}, \quad (4.3.)$$

kus  $R_{Si}$  – piirde sisepinna soojustakistus  $\text{m}^2\text{K/W}$ ;

$R_{Se}$  – piirde välispinna soojustakistus  $\text{m}^2\text{K/W}$ ;

$d_{1(a,b,\dots,n)}, d_{2(a,b,\dots,n)}, \dots d_{n(a,b,\dots,n)}$  – piirde üksikute materjalikihtide paksused komponendis m;

$\lambda_{1(a,b,\dots,n)}, \lambda_{2(a,b,\dots,n)}, \dots \lambda_{n(a,b,\dots,n)}$  – piirde üksikute materjalikihtide soojuseri juhtivus  $\text{W/mK}$ .

Mittehomogeense piirde kogusoojustakistuse alumise piirväärtuse arvutamisel vaadeldakse piirde pinnaga paralleelselt olevaid kihte ning arvutatakse valemiga 4.4. (EVS-EN ISO 6946:2008):

$$R_T'' = R_{Si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{Se}, \quad (4.4.)$$

kus  $R_{Si}$  – piirde sisepinna soojustakistus  $\text{m}^2\text{K/W}$  (arvutustes sein  $R_{Si}=0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) ;  
 $R_{Se}$  – piirde välispinna soojustakistus  $\text{m}^2\text{K/W}$  (arvutustes sein  $R_{Se}=0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ );  
 $R_1, R_2, \dots R_n$  – piirde üksikute kihtide soojustakistused  $\text{m}^2\text{K/W}$ .

Arvutusmetoodika täpsuse hindamiseks arvutati maskimaalne suhteline viga valemiga 4.5. (EVS-EN ISO 6946:2008):

$$e = \frac{R_T' - R_T''}{2R_T} 100\% \leq 20\%, \quad (4.5.)$$

kus  $e$  on maksimaalne lubatud suhteline viga %.

Vastavalt lisa 1 teostatud arvutustulemustele saime Leigo talu saunahoone välisseina kogusoojustakistuse ( $R_T$ ) arvutuslikuks väärtuseks  $6,47 \text{ m}^2\text{K/W}$  ning maksimaalse lubatud suhtelise vea ( $e$ ) väärtuseks  $0,15 \%$ . Seega võib järeldada, et antud metoodika on piisavalt sobilik piirdetarindi soojuslähivuse arvutuslikuks hindamiseks statsionaarsetes tingimustes.

Soojuslikult mittehomogeense piirde soojajuhtivus ehk soojuslähivus arvutati valemiga 4.6. (EVS-EN ISO 6946:2008):

$$U = \frac{1}{R_T}, \quad (4.6.)$$

kus  $U$  on piirdetarindi arvutatud soojuslähivus  $\text{W/m}^2\text{K}$ .

Piirde korigeeritud soojuslähivuse saamiseks tuleb lisaks arvutatud soojuslähivusele arvesse võtta ka erinevatest teguritest tingitud soojuslähivuse parandusi. Korigeeritud soojuslähivuse arvutamiseks kasutati valemit 4.7. (EVS-EN ISO 6946:2008):

$$U_c = U + \Delta U, \quad (4.7.)$$

kus  $U_c$  – piirdetarindi korigeeritud soojuslähivus  $\text{W/m}^2\text{K}$ ;  
 $\Delta U$  – piirdetarindi erinevatest teguritest tingitud soojuslähivuse parandus  $\text{W/m}^2\text{K}$ .

Piirde erinevatest teguritest tingitud soojuslähivuse parandus arvutati valemiga 4.8. (EVS-EN ISO 6946:2008):

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r + \Delta U_a + \Delta U_{\Psi X}, \quad (4.8.)$$

kus  $\Delta U_g$  – tühimikest ja õhupragudest tingitud parandus  $W/m^2K$ ;

$\Delta U_f$  – mehaanilistest kinnititest tingitud parandus  $W/m^2K$ ;

$\Delta U_r$  – pööratud katusest tingitud parandus  $W/m^2K$ ;

$\Delta U_a$  – soojustuse õhujuhtivusest tingitud parandus  $W/m^2K$ ;

$\Delta U_{\Psi X}$  – külmasildadest tingitud parandus  $W/m^2K$ .

Tühimikest ja õhupragudest tingitud parandus arvutati valemiga 4.9. (EVS-EN ISO 6946:2008):

$$\Delta U_g = \Delta U'' \left( \frac{R_l}{R_T} \right)^2, \quad (4.9.)$$

kus  $\Delta U''$  – õhutühikutest tingitud parandustegur  $W/m^2K$ ;

$R_l$  – pragusid sisaldava materjalikihi soojustakistus  $m^2K/W$ ;

$R_T$  – piirdetarindi kogusoojustakistus  $m^2K/W$ .

Mehaanilistest kinnititest tingitud parandus arvutati valemiga 4.10. (EVS-EN ISO 6946:2008):

$$\Delta U_f = \alpha \lambda_f n_f A_f, \quad (4.10.)$$

kus  $\alpha$  – mehaanilist kinnitit iseloomustav tegur;

$\lambda_f$  – mehaanilise kinniti soojuserijuhtivus  $W/mK$ ;

$n_f$  – mehaanilise kinnitite arv ruutmeetri kohta  $1/m^2$ ;

$A_f$  – ühe mehaanilise kinniti ristlõike pindala  $m^2$ .

Pööratud katusest tingitud parandus arvutati valemiga 4.11. (EVS-EN ISO 6946:2008):

$$\Delta U_r = p f x \left( \frac{R_l}{R_T} \right)^2, \quad (4.11.)$$

kus  $p$  – keskmine sademete hulk kütteperioodi ühe ööpäeva jooksul  $mm/ööpäevas$ ;

$f$  – dreanažitegur, mis näitab, milline osa sademete hulgast  $p$  jõuab veekindla katusekatteni;

$x$  – soojuskao kasvutegur, mis on põhjustatud sadevee voolamisest veekindlal katusekattel  $\text{Wööpäev/m}^2\text{Kmm}$ ;

$R_1$  – veekindla katusekatte peal asuva soojustuskihi soojustakistus  $\text{m}^2\text{K/W}$ ;

$R_T$  – katuselae kogusoojustakistus enne paranduse arvesse võtmist  $\text{m}^2\text{K/W}$ .

Soojustuse õhujuhtivusest tingitud parandus arvutati valemiga 4.12. (EVS-EN ISO 6946:2008):

$$\Delta U_a = \Delta U_a'' \left( \frac{R_a}{R_T} \right)^2, \quad (4.12.)$$

kus  $\Delta U_a''$  – tegur  $\text{W/m}^2\text{K}$ ;

$R_a$  – õhujuhtiva materjalikihi soojustakistus  $\text{m}^2\text{K/W}$ ;

$R_T$  – piirdetarindi kogusoojustakistus  $\text{m}^2\text{K/W}$ .

Külmasildadest tingitud parandus arvutati valemiga 4.13. (EVS-EN ISO 6946:2008):

$$\Delta U_{\Psi X} = \frac{\sum \Psi_j l_j}{A} + \frac{\sum \Psi_p n_j}{A}, \quad (4.13.)$$

kus  $\Psi_j$  – joonkülmasilla lisajuhtivus  $\text{W/mK}$ ;

$l_j$  – joonkülmasilla pikkus  $\text{m}$ ;

$\Psi_p$  – punktkülmasilla lisajuhtivus  $\text{W/K}$ ;

$n_p$  – samasuguste punktkülmasildade arv välispiirdeosas;

$A$  – piirdetarindi pindala  $\text{m}^2$ .

Antud magistritöö koostamise hetkel kehtib Majandus- ja taristusministri määrus nr. 55 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ RT I, 05.06.2015,15, mis kehtestab ühtlasi esmase lähenemise välisseinte soojuslähivusele:

- elamud –  $0,12\text{--}0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;
- mitteelamud –  $0,15\text{--}0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Vastavalt lisas 1 toodud arvutustele saime Leigo talu põhupakkidest soojustusega puitkarkasshoone seina korrigeeritud soojuslähivuse arvutuslikuks väärtuseks  $U_e=0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ , mis esmase lähendusena on sobilik nii elamute kui ka mitteelamute välisseinte soojuslähivuse väärtuseks ning on kooskõlas hetkel kehtivate energiatõhususe miinimumnõuetega.

### 3.2 Mittehomogeensetest kihtidest välisseina arvutuslik niiskusrežiim statsionaarsetes tingimustes

Katsehoone niiskustehnilised arvutused on teostatud vastavalt standardile „EVS-EN ISO 13788:2012.“

Põhupakkidest soojustusega katsehoone piirdetarindi veeauru kondenseerumise ja hallituse vältimise kontrollimiseks valiti lähipiirkonnaks Eesti kliimaatilise kaardi alusel Tartu piirkond. Arvutuste teostamiseks vajalikud parameetrid pärinevad allikast „ET-2 0102-0329. Eesti kliima teatmik ehitajale. Mai 2000“.

#### 3.2.1 Eesti niiskustehnilise baasaasta analüüs lähipiirkonnas kuude lõikes Tartu põhjal

Välise veeauru osarõhu arvutamiseks kasutati valemit 4.14. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$p_e = \varphi_e p_{sat}(\theta_e), \quad (4.14.)$$

kus  $p_e$  – väline veeauru osarõhk Pa;

$\varphi_e$  – väline suhteline õhuniiskus;

$p_{sat}(\theta_e)$  – väline küllastunud veeauru osarõhk, mis vastab antud välistemperatuurile ( $\theta_e$ ) Pa.

Väline küllastunud veeauru osarõhk arvutati valemiga 4.15. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$p_{sat}(\theta_e) = 610.5 e^{\frac{17.269\theta_e}{237.3+\theta_e}}, \quad \text{kui } \theta_e \geq 0, \quad (4.15.)$$

või valemiga 4.16. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$p_{sat}(\theta_e) = 610.5 \cdot e^{\frac{21.875\theta_e}{265.5+\theta_e}}, \quad \text{kui } \theta_e < 0, \quad (4.16.)$$

kus  $\theta_e$  on väline temperatuur °C.

Ruumis sees oleva veeauru osarõhu arvutamiseks kasutati valemit 4.17. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$p_i = p_e \Delta p, \quad (4.17.)$$



kus  $p_i$  – ruumis sees oleva veeauru osarõhk Pa;

$\Delta p$  – niiskusklassist tulenev ruumis sees olev niiskusklass, mis on ümber arvutatud veeauru osarõhuks Pa.

Minimaalse veeauru küllastusrõhu arvutamiseks piirde sisepinnal kasutati valemit 4.18. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$p_{sat}(\theta_{si}) = \frac{p_i}{\phi_{sicc}}, \quad (4.18.)$$

kus  $\phi_{sicc}$  – pinna kriitiline suhteline niiskus;

$p_{sat}(\theta_{si})$  – minimaalne veeauru küllastusrõhk piirde sisepinnal sisetemperatuuril  $(\theta_{si})$  Pa.

Minimaalne lubatud pinnatemperatuur sõltuvalt minimaalsest veeauru küllastusrõhust piirde sisepinnal arvutati valemiga 4.19. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$\theta_{si.min} = \frac{237.3 \ln\left(\frac{p_{sat}(\theta_{si})}{610.5}\right)}{17.269 - \ln\left(\frac{p_{sat}(\theta_{si})}{610.5}\right)} \quad kui \quad p_{sat}(\theta_{si}) \geq 610.5 Pa, \quad (4.19.)$$

või valemiga 4.20. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$\theta_{si.min} = \frac{265.5 \ln\left(\frac{p_{sat}(\theta_{si})}{610.5}\right)}{21.875 - \ln\left(\frac{p_{sat}(\theta_{si})}{610.5}\right)} \quad kui \quad p_{sat}(\theta_{si}) < 610.5 Pa, \quad (4.20.)$$

kus  $\theta_{si.min}$  on minimaalne lubatud pinna temperatuur °C.

Sisepinna arvutuslik temperatuuritegur leiti valemiga 4.21. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$f_{si.min} = \frac{\theta_{si.min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}, \quad (4.21.)$$

kus  $f_{si.min}$  – arvutuslik temperatuuritegur sisepinnal;

$\theta_i$  – ruumi sisetemperatuur °C;

$\theta_e$  – väline temperatuur °C.

Seina sisepinna arvutuslik temperatuur leiti valemiga 4.22. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$\theta_{si} = \theta_i - \frac{R_{si}}{R_T} (\theta_i - \theta_e). \quad (4.22.)$$

Välispinna arvutuslik temperatuur arvutati valemiga 4.23. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$\theta_{se} = \theta_e - \frac{R_{se}}{R_T} (\theta_i - \theta_e). \quad (4.23.)$$

Sisemine küllastunud veeauruosarõhk arvutati valemiga 4.24. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$p_{sat}(\theta_i) = 610.5 e^{\frac{17.269\theta_i}{237.3+\theta_i}}, \quad \text{kui } \theta_i \geq 0, \quad (4.24.)$$

või valemiga 4.25. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$p_{sat}(\theta_i) = 610.5 e^{\frac{21.875\theta_i}{265.5+\theta_i}}, \quad \text{kui } \theta_i < 0. \quad (4.25.)$$

Sisemine suhteline õhuniiskus arvutati valemiga 4.26. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$\varphi_i = \frac{p_i}{p_{sat}(\theta_i)} \cdot 100\%, \quad (4.26.)$$

kus  $\varphi_i$  on ruumi sisemine suhteline õhuniiskus %.

### 3.2.2 Saunahoone välisseina niiskustehniline analüüs kuude lõikes

Materjalikihi suhteline diffusioonitakistus arvutati valemiga 4.27. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$S_d = \mu \cdot d, \quad (4.27.)$$

kus  $S_d$  – materjalikihi suhteline difusioonitakistus m;

$\mu$  – materjali difusioonitakistustegur;

$d$  – materjalikihi paksus m.

Välisseina erinevate kihtide soojustakistus arvutati valemiga 4.28. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_{d,i}}, \quad (4.28.)$$

kus  $R_i$  – seinava kihi soojustakistus m<sup>2</sup>K/W;

$d_i$  – vastava materjalikihi paksus seinas m;

$\lambda_{i,d}$  – seinava kihi materjali arvutuslik soojuserijuhtivus W/mK.

Välisseina erinevate kihtide pinnatemperatuurid arvutati valemiga 4.29. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$\theta_n = \theta_e - \frac{R_n}{R_T} (\theta_i - \theta_e), \quad (4.29.)$$

kus  $\theta_n$  – temperatuur materjalidekihtide vahel °C;

$R_n$  – seinakihtide summeeruv soojustakistus väliskeskkonnast m<sup>2</sup>K/W.

Küllastunud veeauru osarõhk materjalikihtide vahel arvutati valemiga 4.30. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$p_{sat} = 610.5e^{\frac{17.269\theta_n}{237.3+\theta_n}}, \quad kui \quad \theta_n \geq 0, \quad (4.30.)$$

või valemiga 4.31. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$p_{sat} = 610.5e^{\frac{21.875\theta_n}{265.5+\phi_n}}, \quad kui \quad \phi_n < 0, \quad (4.31.)$$

kus  $p_{sat}$  on küllastunud veeauru osarõhk materjalide kihtide vahel Pa.

Materjalikihi veeaurutakistus arvutati valemiga 4.32. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$Z_i = 1.5 \cdot 10^6 S_d, \quad (4.32.)$$

kus  $Z_i$  on materjalikihi veeaurutakistus m<sup>2</sup>hPa/kg10<sup>6</sup>.

Veeauru osarõhk materjalide kihtide vahel arvutati valemiga 4.33. (EVS EN ISO 13788:2012):

$$p_n = p_i - (p_i - p_e) \frac{Z_n}{\sum Z}, \quad kui \quad p_n < p_{sat}, \quad (4.33.)$$

või valemiga 4.34. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$p_n = p_{sat}, \quad kui \quad p_n \geq p_{sat}, \quad (4.34)$$

kus  $p_n$  – veeauru osarõhk materjali kihtide vahel (P);

$Z_n$  – summeeritud veeaurutakistus sisekeskkonnast vaadeldava kihtide vaheni m<sup>2</sup>hPa/kg10<sup>6</sup>.

Materjalikihtide vaheline suhteline õhuniiskus arvutati valemiga 4.35. (EVS-EN ISO 13788:2012):

$$\varphi_n = \frac{p_n}{p_{sat}} 100\%, \quad (4.35.)$$

kus  $\varphi_n$  on materjalikihtide vaheline suhteline õhuniiskus %.

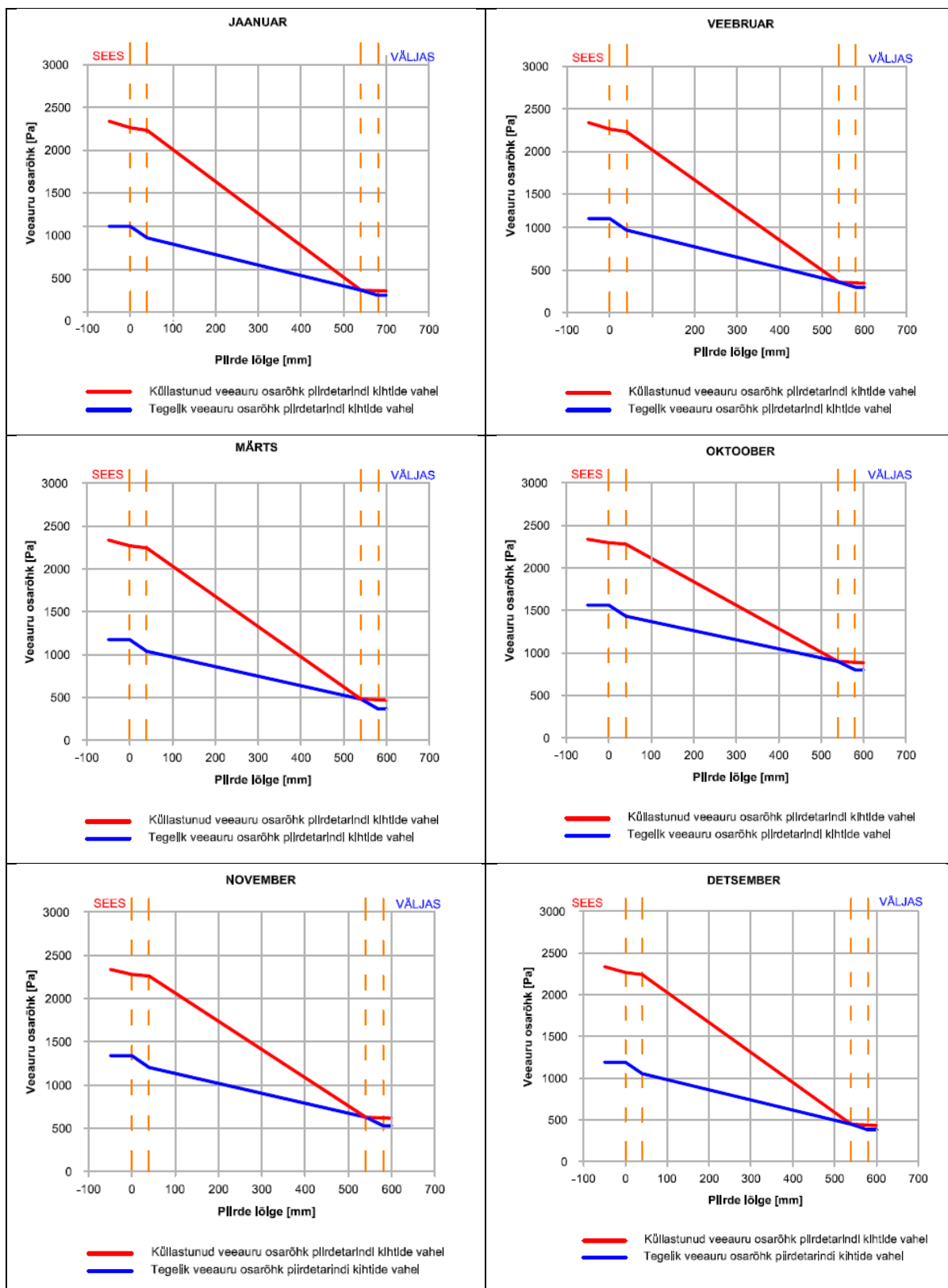
Kondensaadi tekke hindamiseks tuleb vaadata järgmisi tingimusi:

$$p_n \geq p_{sat} \Rightarrow \textit{kondensaad},$$

$$p_n < p_{sat} \Rightarrow \textit{kondensaati ei teki}.$$

Kui tegelik veeauru osarõhk materjalide kihtide vahel saab võrdseks küllastunud veeauru osarõhuga, siis hakkab veeaur kondenseeruma ning pind märgub.

Põhupakkidest soojustusega puitkarkassist Leigo talu saunahoone piirdetarindi niiskusrežiimi arvutustulemused on toodud lisas 2 ja 3 ning esitatud graafiliselt joonistel 14 ja 15. Veeauru osarõhkue graafikutelt on näha, et õhuniiskus võib kondenseeruda põhupakkide ja välisviimistluseks kasutatud lubikrohvi piiripinnal. Difusiooni tõttu kondensaadi teke seinas on täheldatav järgmistel kuudel aastas: jaanuaris, veebruaris, märtsis, oktoobris, novembris ja detsembris, mis moodustavad kondenseerumisperioodi. Aurustumisperioodil (aprillist kuni septembrini) diffusiooni tõttu kondenseerumist põhupakkidega soojustatud saunahoone välisseintes ei toimu, mida väljendavad ka joonisel 15 esitatud tegeliku ja küllastunud veeauru osarõhkude graafikud.



**Joonis 14.** Kondenseerumisperioodil statsionaarsetes tingimustes arvatatud seinatarindi küllastunud ja tegeliku veeauru osarõhud

Kõikide piirdetarindite projekteerimisel tuleks vältida kondensaadi teket piirdes või kondensatsioonivee tekkimisel tuleb luua tingimused selle välja kuivamiseks. (EET-2 0404-0764, 2009)

Tuginedes Glaseri meetodile, ei tohi kondenseerumisperioodil kondenseerunud vee hulk ületada aurustumisperioodil välja kuivavat vee hulka. Lisaks peab olema täidetud ka tingimus, kus kondenseerunud vee hulk on väiksem kui  $1,0 \text{ kg/m}^2$  (EET-2 0404-0764, 2009). Vastavate tingimuste kontrollimiseks teostati kondenseerunud ja välja kuivanud vee koguse arvutused.

Kondenseerumisperioodil tekkiv vee hulkkuude lõikes arvutati valemiga 4.36. (EET-2 0404-0764, 2009)

$$G_{cond} = t_{cond} (i_i - i_e), \quad (4.36.)$$

kus  $G_{cond}$  – ajaühikus kondenseerunud vee hulk  $\text{kg/m}^2$ ;

$t_{cond}$  – kondenseerumisperiood h;

$i_i$  – difusioonivoo tihedus kondenseerumispiirkonda sisekeskkonnast võttes  $\text{kg/m}^2\text{h}$ ;

$i_e$  – difusioonivoo tihedus kondenseerumispiirkonda väliskeskkonnast võttes  $\text{kg/m}^2\text{h}$ .

Difusioonivootihedus kondenseerumispiirkonda sisekeskkonnast võttes arvutati valemiga 4.37. (EET-2 0404-0764, 2009)

$$i_i = \frac{p_i - p_{cond}}{\sum Z_i}, \quad (4.37.)$$

kus

$p_i$  – kondenseerumisperioodil ruumis sees oleva veeauru osarõhk Pa;

$p_{cond}$  – kondenseerumispunktis küllastunud veeauru osarõhk Pa;

$\sum Z_i$  – seest poolt kuni kondenseerumispunktini materjali kihtide veeauru takistuste summa  $\text{m}^2\text{hPa/kg}10^6$ .

Difusioonivootihedus kondenseerumispiirkonda väliskeskkonnast võttes arvutati valemiga 4.38. (EET-2 0404-0764, 2009)

$$i_e = \frac{p_{cond} - p_e}{\sum Z_e}, \quad (4.38.)$$

kus

$p_e$  – kondenseerumisperioodil väline veeauru osarõhk Pa;

$\sum Z_e$  – väljast poolt kuni kondenseerumispunktini materjali kihtide veeauru takistuste summa  $\text{m}^2\text{hPa/kg10}^6$ .

Aurustumisperioodil välja kuivatav vee hulk kuude lõikes arvutati valemiga 4.39. (EET-2 0404-0764, 2009)

$$G_{dry} = t_{dry}(i_i + i_e), \quad (4.39.)$$

kus  $G_{dry}$  – ajaühikus aurustunud vee hulk  $\text{kg/m}^2$ ;

$t_{dry}$  – kuivamisperiood h;

$i_i$  – difusioonivoo tihedus kondenseerumiskiirkonnast sisekeskkonda  $\text{kg/m}^2\text{h}$ ;

$i_e$  – difusioonivoo tihedus kondenseerumiskiirkonnast väliskeskkonda  $\text{kg/m}^2\text{h}$ .

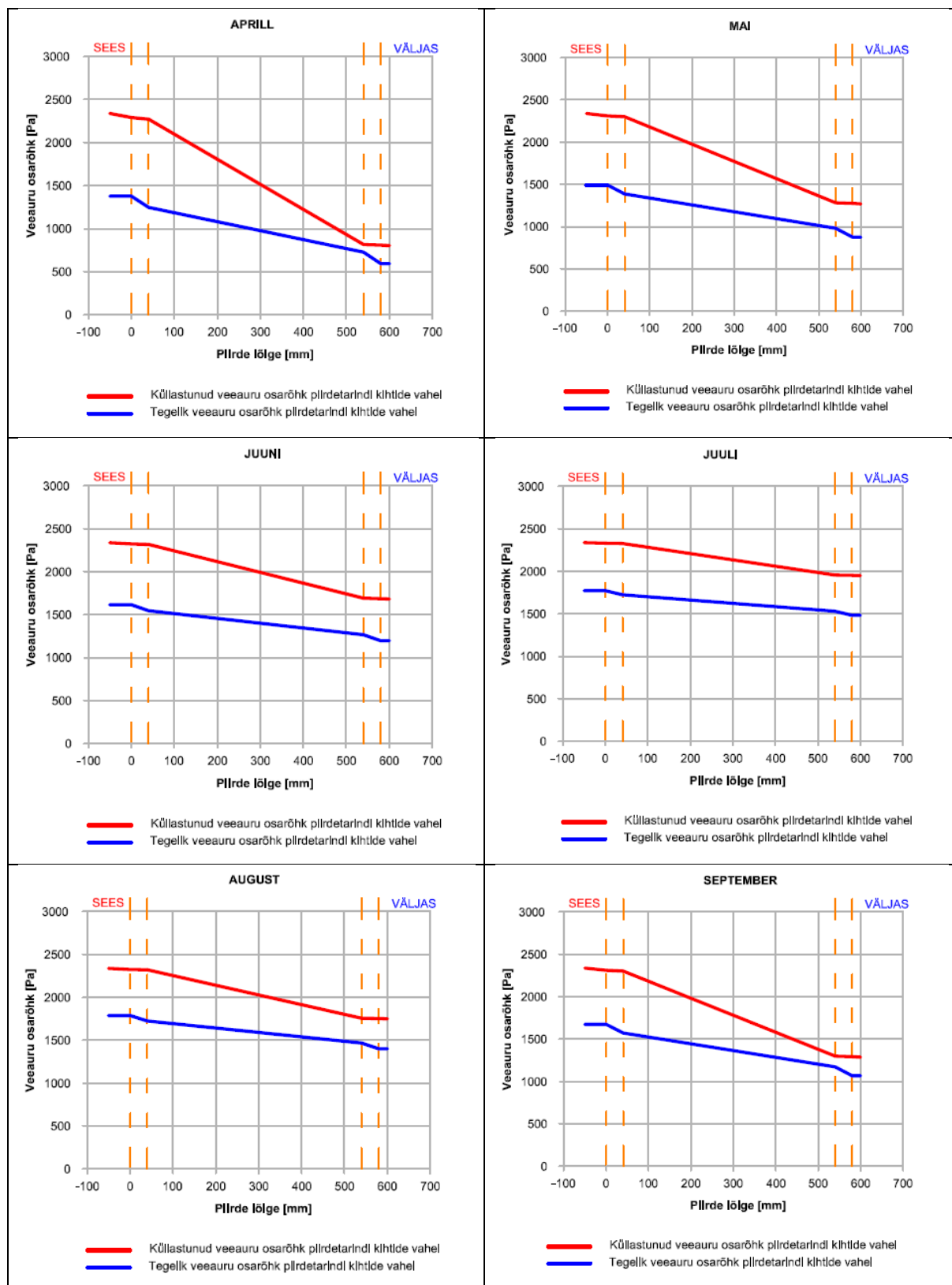
Difusioonivoo tihedus kondenseerumiskiirkonnast sisekeskkonda arvutati valemiga 4.40. (EET-2 0404-0764, 2009)

$$i_i = \frac{P_{cond} - P_i}{\sum Z_i}. \quad (4.40.)$$

Difusioonivoo tihedus kondenseerumiskiirkonnast väliskeskkonda arvutati valemiga 4.41. (EET-2 0404-0764, 2009)

$$i_e = \frac{P_{cond} - P_e}{\sum Z_e}. \quad (4.41.)$$

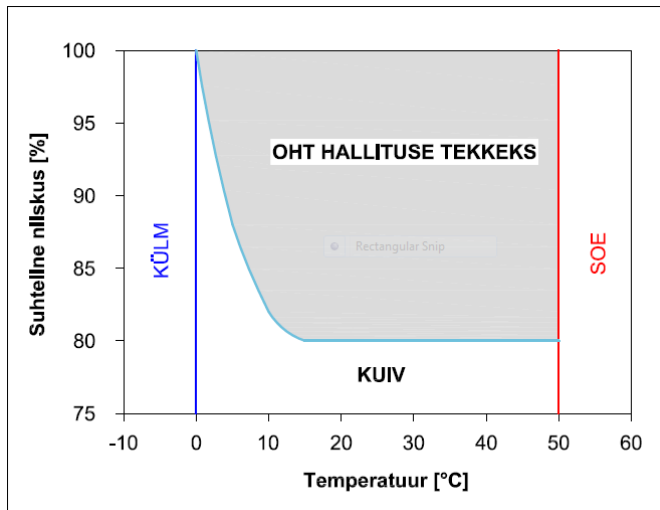
Arvutatud tulemused koondati tabelisse, mis on toodud lisas 4. Saadud tulemuste põhjal kontrolliti piirde niiskusežiimi arvutuslikku sobivust Glaseri meetodile. Arvutatud tulemuste põhjal on näha, et aasta lõikes kondenseerumisperioodil: jaanuaris  $0,144 \text{ kg/m}^2$ , veebruaris  $0,119 \text{ kg/m}^2$ , märtsis  $0,04 \text{ kg/m}^2$ , oktoobris  $0,059 \text{ kg/m}^2$ , novembris  $0,071 \text{ kg/m}^2$  ja detsembris  $0,136 \text{ kg/m}^2$ , ei ületanud difusiooni tõttu kondenseerunud vee hulk ette antud piirmäära –  $1,0 \text{ kg/m}^2$ . Ühtlasi on aasta lõikes aurustumisperioodil: aprillis  $0,159 \text{ kg/m}^2$ , mais  $0,561 \text{ kg/m}^2$ , juunis  $0,766 \text{ kg/m}^2$ , juulis  $0,79 \text{ kg/m}^2$ , augustis  $0,543 \text{ kg/m}^2$  ja septembris  $0,229 \text{ kg/m}^2$ , välja kuivatava vee kogus suurem kui kondenseerumisperioodil kondenseerunud vee kogus. Tänu väliskrohvi ja põhupakkide vahel tekkivale kondensaadile tuleb kindlasti kontrollida ka hallituse teket Leigo talu saunahoone välisseinas.



*Joonis 15. Aurustumisperioodil statsionaarsetes tingimustes arvutatud seinatarindi küllastunud ja tegeliku veeauru osarõhud*



Planeeritava konstruktsiooniga Leigo talu põhupakkidest soojustusega välisseina hallituse tekkeks peab õhu suhteline niiskus olema suurem kui ~75-80 % (EVS-EN ISO 13788:2012). Lisaks niiskusele on hallituse tekkeks ja kasvuks vaja piirdekonstruktsioonides või -pindadel tarvis ka sobivat temperatuuri, mis peab jääma 0...50°C vahele (joonis 16) (Hukka, Viitanen 1999).



**Joonis 16.** Sobivaimad tingimused hallituse tekkeks (Hukka, Viitanen 1999)

Arvutustulemustele (lisa 2, lisa 3 ja lisa 4) tuginedes võime järeldada, et kondensaadi tekke seisukohast on projekteeritud Leigo talu saunahoone põhupakkidest välisseina piirdetarind sobilik. Kondensaadi teke ei ole küll välistatud ning kondenseerumisperioodil toimub veeauru kondenseerumine põhupakkide ja välisviimistluse (lubikrohvi) piiripinnal, aga samas aurustumisperioodil jõuab eelnevalt kondenseerunud vesi piirdetarindist välja kuivada. Ühtlasi ei ületa kondenseerunud vee hulk  $1 \text{ kg/m}^2$  piirmäära. Hallituse tekke seisukohalt on „kriitiliseks piirkonnaks“ piirdes põhupakkide ja välisviimistluskihi (lubikrohvi) piiripind, kus suhteline õhuniiskus püsib aastaringselt ~75...100% vahemikus. Vastavalt joonisele 16 ning lisa 2 ja 3 toodud arvutustulemustele on jaanuaris, veebruaris, märtsis, aprillis ja mais hallituse teke „kriitilises piirkonnas“ ebatõenäoline liiga madala temperatuuri tõttu. Juunis, juulis, augustis, septembris ja oktoobris on hallituse tekkeks sobivad niiskuse ja temperatuuri tingimused „kriitilises piirkonnas“ olemas. Novembris ja detsembris on jällegi hallituse teke „kriitilises piirkonnas“ eeldatavalt välistatud just nullist madalamate temperatuuride tõttu. Seega võib Leigo talu saunahoone välisseinas tekkida hallitus just suve- ja sügiskuudel, mis vajab täiendvat uurimist.

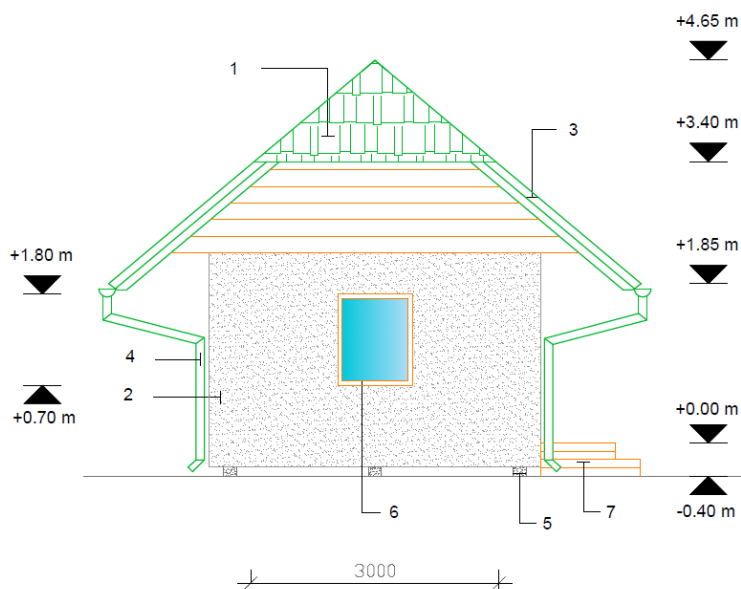
## 4. PÕHUPAKKIDEST SAUNAHOONE EHTUS LEIGO TALUS

Leigo talu saunahoone ehitustöödega seotud tegevused (ehituspäevik) on esitatud lisas 5.

### 4.1 Kavandamine ja projekteerimine

Käesoleva magistritööga on kavandatud projekteerida ning ehitada puitkarkasstarindiga põhupakkidest soojustusega saunahoone. Plaanitud hoone hakkab paiknema Valga maakonnas Palupera vallas Lutike külas Leigo kinnistul. Kinnistu on hoonestatud ja hoonete vahelised tuleohutuskujad on tagatud.

Abihoone on projekteeritud 1,5 korruselise hoonena. Poolkelpkatus, kaldega 40°, kaetakse rohelse betoonist katusekiviga. Hoone pikkus on 6,50 m, laius 4,00 m ja kõrgus on 4,65 m, mille suletud netopind on 18,2 m<sup>2</sup>. Hoone välisarhitektuurne vormistus on võrdlemisi lihtne, mis tagab hoonele madala ehitusmaksumuse, samuti on projekteerimisel arvesse võetud, et hilisemad ekspluatatsioonikulud oleks võimalikult madalad. Põhupakkidest välisseinad on kavandatud katta lubikrohviga, mis viimistletakse sobiva fassaadivärviga. Välisseinte ilmestamiseks kaetakse puitkarkassist kelbad servamata vertikaallaudisega (joonis 17).

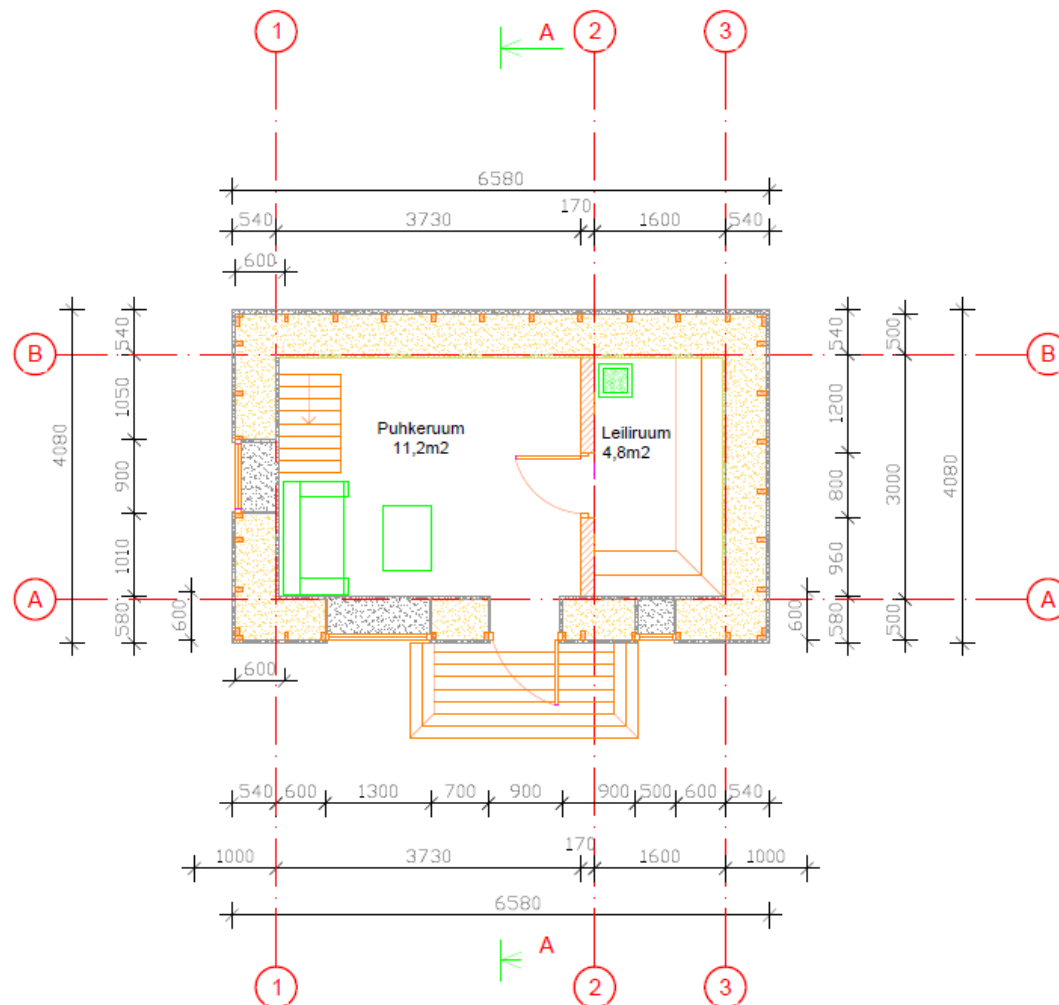


**Joonis 17.** Leigo talu põhupakkidest saunahoone vaade kagust. 1. Katuse - roheline kivi 2. Fassaad – helehall lubikrohv 3. Tuulekast – pruun puitlaudis 4. Vihmaveesüsteem – roheline ümarplekk 5. Postvundament – R/B 6. Aken – pruun puit 7. Trepp – pruun puit

Katuse vihmavee äravool lahendatakse ümarrennide ja -torudega läbimõõduga 100 mm. Sajuveed suunatakse hoonest eemale. Räästakastid kaetakse viimistletud puitlaudisega, jättes laudise vahele 10 mm tuulutuspilud.

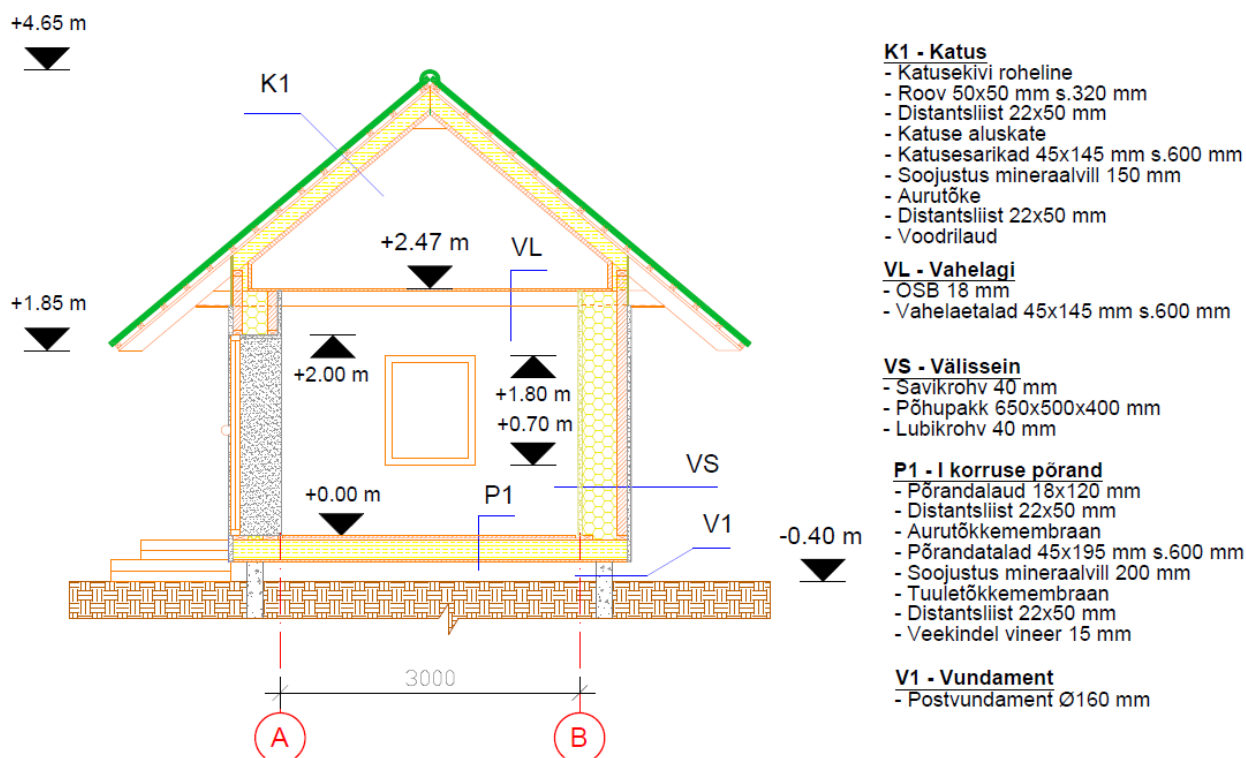
Maja esimeselt korruselt teisele viib puidust trepp. Põhumaja kavandatud puidust made paigaldatakse tambitud pinnasele, mille viimistlus peab kattuma hoone üldise väljanägemisega. Välisseinte avade katmiseks on planeeritud kahekordsed puitraamil pakettaknad ning soojustatud puituks. Krundil on olemasolev autode sissesõidutee, parkla ja käigutee.

Esimesele korruse (joonis 18) tasapinnas paiknevad puhkeruum ja saun, mis on eraldatud puidust kergvaheseinaga. Eraldi pesuruumi pole ette nähtud, sest pesemine toimub leiliruumis.



**Joonis 18.** Leigo talu põhupakkidest sauahoone 1. korruse plaan

Hoone teine korrus on kavandatud ruumina, mida on võimalik kasutada magamistoana. Joonisel 19 on esitatud saunahoone lõige.

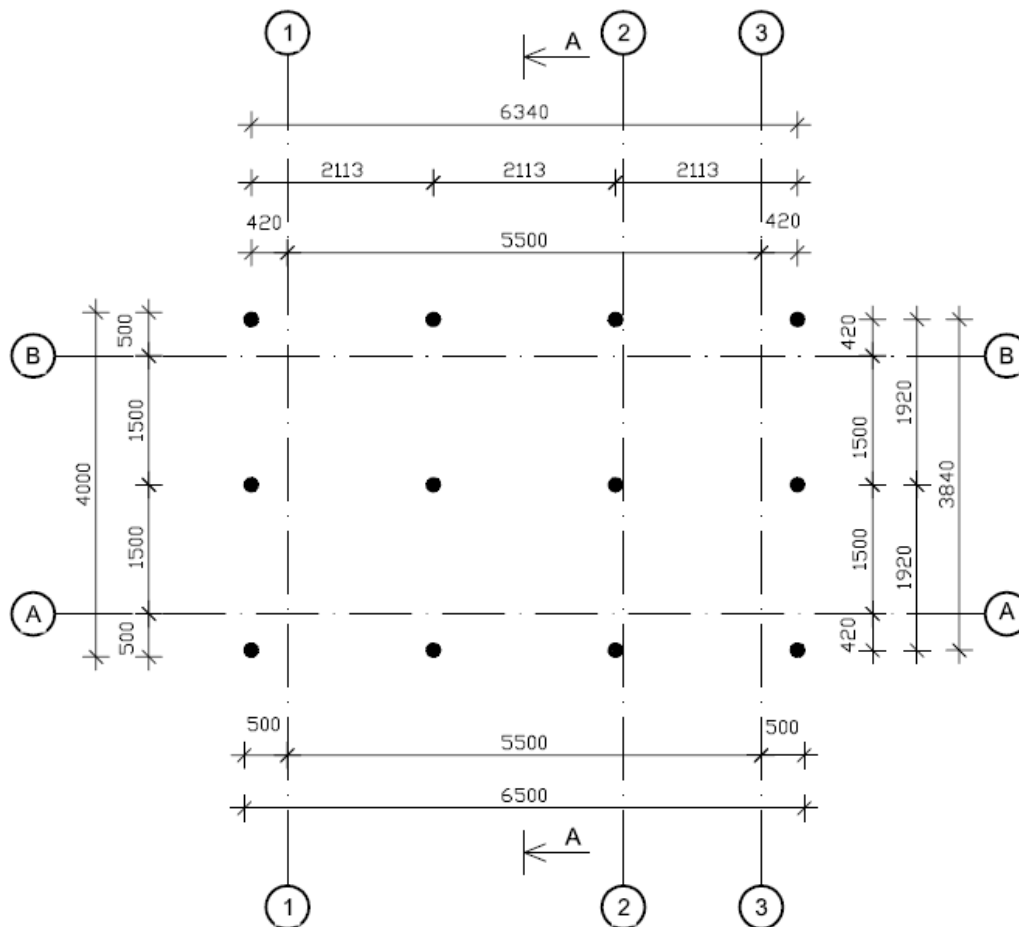


**Joonis 19.** Leigo talu põhupakkidest saunahoone lõige A-A

Ehitustööde teostamise aluseks on eelprojekt, mille järgi on võimalik ehitustöid teha ja kontrollida.

## 4.2 Vundamendi ehitus

Käesolev kinnistu on looduslik rohumaa leht- ja okaspuudega, millest osa jäävad tulevasele ehitusalale. Vundmentitööde esimeseks etapiks oli ehitusplatsi raadamine ja ettevalmistus, mis hõlmas kavandatud hoone võsastunud pinna puhastamist. Puitkarkasstarindiga põhupakkidest soojustusega hoone on rajatud R/B postvundamentidele läbimõõduga 160 mm. Lähtudes Ehituskonstruktori käsiraamatu tabeli 9.17 andmetest on Tartu piirkonna pinnase keskmise arvutuslik külmumissügavus 1,35 m (Masso *et al.* 2014: 227) Külmakerkeohu vältimiseks on Leigo talu põhumaja postvundamendid rajatud vähemalt 1,35 m sügavusele maapinnast, mis toetuvad otse aluspinnale. Vundament on projekteeritud mõõtudega 6,5x4 m ning koosneb kaheteistkümnest raudbetoonpostist (joonis 20).



**Joonis 20.** Leigo talu põhupakkidest soojustusega saunahoone vundamendiplaan

Ümarpostide raketiseks kasutati metallist ventilatsioonitoru läbimõõduga 160 mm ning betoneerimiseks Sakret BE kuivbetooni survetugevusklassiga C25/30. Vundamendipostide stabiilsuse tagamiseks täideti ning tihendati kaevikud kruusaga järgmisel päeval pärast betooni tahenemist.

### 4.3 Kandva puitkarkassi ehitus

Põhusauna põranda kandekonstruktsiooniks on 45x195 mm puitprussid tugevusklassiga C24. Puitkarkass sammuga 600 mm on paigaldatud postvundamentidele (joonis 21). Kapillaarniiskuse tõkestamiseks on betoon puidust eraldatud SBS bituumenkattega. Põrand on soojustatud 200 mm mineraalvillaga, millele järgneb aurutõkkemembraan (hingav, vettpidav ja veeauru läbilaskev aluskate), distantssliist 22x50 mm ja põrandalaud mõõtudega 28x120 mm. Põranda kandekonstruktsiooni alumisse ossa paigaldati

tuuletõkkemembraan, distanttsliist 22x50 mm tuulutusvahe moodustamiseks ning 15 mm veekindel vineer.



**Joonis 21.** Saunahoone põrandakarkass 45x195 mm, C24

Leigo põhupakkidest soojustusega saunahoone on ehitatud karkasstarindiga (joonis 22). Karkass võtab vastu seintest, vahelagedest ja katuselt tuleva koormuse ning kannab selle üle vundamendile. Kandvad välisseinad on rajatud 50x100 mm puitpostidest, mis toetuvad vööprussile mõõduga 45x145 mm. Postid on paigutatud põhupakkidest tarindi välisküljele, sammuga 600 mm. Vahelae prussid, 45x145 mm, toetuvad vahevöötalale ning katusesõrestik ülemisele vöötalale. Teise korruse põrandakatteks on 18 mm OSB3 plaat, mis on paigaldatud vahelaetaladele. Sarikate materjaliks on kasutatud 45x145 mm puitprusse, mille paigalduse sammuks on 600 mm. Välisseinte avade sildamisel on kasutatud tugevsorteeritud puitprusse.





***Joonis 22.** Leigo talu saunahoone karkasstarind*

Joonisel 22 on näha seina kandvaid puitposte 50 x 100 mm ja katusekivide paigalduseks ette valmistatud katuse alustarindit.

Hoonel on poolkelpkatus kaldega 40°. Viilkatusega osas on paigaldatud katuslae soojustuseks 150 mm mineraalvilla. Puitsarikatele paigaldati hingav aluskate, seejärel distantssliist 25x50 mm, millele järgnevad puitroovid 50x50 mm sammuga 320 mm. Katusekatteks on roheline betoonkatusekivi. Aluskonstruktsiooni lõplik lahendus on teostatud vastavalt valitud katusetootja juhendile. Räästakastid on vooderdatud kuivatatud laudadega, mis on paigaldatud hõrelaudisena, et tagada katuse tuulutus.

## **4.4 Põhupakkide paigaldus ja viimistlemine**

### **4.4.1 Põhupakkide varumine**

Põhuseinte ehitamiseks on vaja põhupakke. Ehitustööde planeerimise esialgseks ideeks oli sobivate põhupakkide varumine lähikümbruses tegutsevatelt teraviljakasvatajatelt. Otsingute käigus selgus, et ehituseks sobivaid põhupakkide valmistajat ei leidu, mistõttu tuli otsida teine võimalus. Leigo talu peremehel oli pakkimismasin Fortschritt K 454, mis ei olnud ammu rakendust leidnud. Masina ehitusaasta on 1987, mass 2390 kg, põhupakkide pakkimise laius 400-500 mm ja pikkus 400-1200 mm ning pakkimise tihedus

100-200 kg/m<sup>3</sup>. Viljakoristuse perioodi alguseks oli pakkimismasin töökorras, remonditud ning hooldatud. Pakkimise materjal on hangitud 3 km kaugusel olevalt rukkipõllult.



**Joonis 23.** Pakkimismasin Fortschritt K 454

Viljakoristuse aeg oli 19.08.2016 ning selles osalised antud töö autorid. Järgmisel hommikul alustati põhu kaarutamis- ning pakkimistöödega, mis kestsid 12 tundi (joonis 23). Kaks päeva pärast viljalõikust alustati põhupakkide veoga viljapõllult Leigo talu objektile. Ligikaudu 550 põhupaki transportimine kestis 9 tundi ning toimus kahe sõiduvahendiga: Ford Transit ja Kamaz 5511 (joonis 24). Materjal ladustati kinnikaetult saunahoone planeeritava asukoha kõrvale selliselt, et alumine rida oleks tuulutatav. Hoone soojustuseks varutud põhupakid olid mõõtudega 650x500x400 mm.

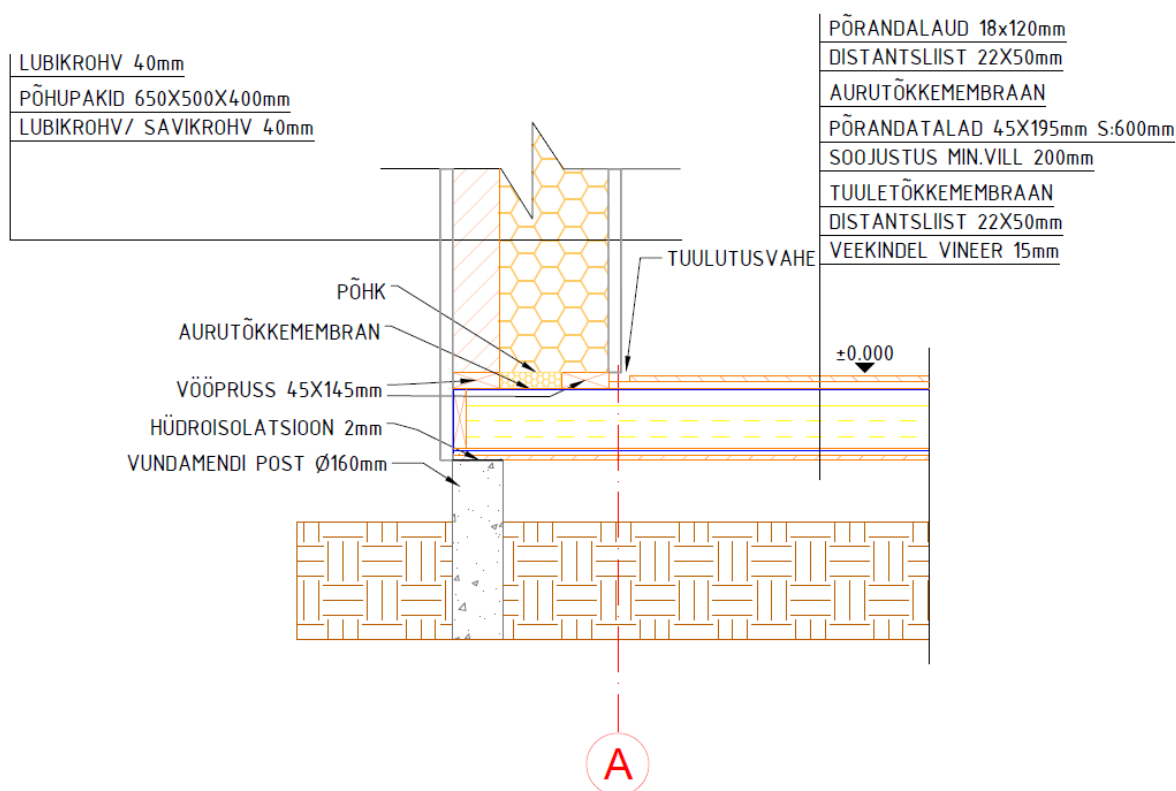


**Joonis 24.** Põhupakkide transport Leigo tallu



#### 4.4.2 Põhupakkide paigaldus

Välispiirete soojustamisel on oluline põhupakkide kaitsmine vihma eest, mistõttu alustati isolatsioonitöödega pärast katuse aluskatte tööde lõpetamist. Esimeseks ülesandeks oli sisemiste vööprusside paigaldus põrandakonstruktsioonile, mille tarbeks kasutati tugevussorteeritud ehituspuitu mõõtmetega 45x145 mm. Et hoida eemal niiskust ja tagada alumiste põhupakkide ventileerimine, paigaldati eelnevalt vööprusside alla aurutõkkemembraan ning vööprusside vahe täideti lahtise põhuga (joonis 25). Põhupakkide esimene rida on paigaldatud 20 mm kõrgemale põranda viimistluskihist, mis takistab isolatsiooni märgumist vee sattumisel põrandale.



**Joonis 25.** Leigo talu põhupakkidest saunahoone soklisõlm

Välisseinte karkassi paigutus sõltub põhupakkide välismõõtmetest. Postide sammuks valiti 600 mm, kuna põhupakkide keskmine pikkus oli 650 mm. Sellisel juhul asetuvad põhupakid teineteise kõrval võimalikult tihedalt ning tühimike tekkimise võimalus on minimaalne. Põhupakkide ladumise tegutsemisviis sarnanes ehituskivide ladumise metoodikale - ridade kaupa, alustades nurkadest ning võimalusel sobitada pakid selliselt, et iga järgmise rea põhupakk toetub keskelt alumiste liitekohtadele.

Saunahoone välispiirde põhupakid on laotud horisontaarselt ja lapiti. Esimese rea paigaldamisel 500 mm toetuspinnaga kasutati võimalikult sarnaste mõõtmetega pakke, millega moodustati põhupakkidest müüritise alkujuu. Tuleb meeles pidada, et mida sirgem on horisontaalses suunas esimene rida, seda väiksemad tühimikud järgnevate pakside vahele tekivad. Et vältida külmasildade teket, täideti kõik horisontaal- ning vertikaalvuugid lahtise põhuga enne uue rea ladumist. Põhumaja puitkarkass on paigutatud hoone välispiirdesse selliselt, et põhusein on karkassiga ühel joonel. Kuna põhupakid olid erinevate mõõtudega, tuli paigaldamisel kasutada erinevaid abivahendeid. Üks lihtsustav moodus oli karkassi soonte lõikamine mootorsaega. Põhk on elastne matrejal, mistõttu piisas soontest, mille mõõtmed on väiksemad posti omadest. Selline võte tagas tiheda kokkupuute puidu ja põhu vahel.

Saunahoone soojustamise tarbeks oli varutud ligikaudu 2 korda rohkem põhupakke. Seetõttu valiti ehitamiseks pakside seast võimalikult tihedaid ja kuivi pakke. Samuti sõltub välispiirde soojusläbivus pakside tihedusest. Vastavalt Loodusehitus OÜ meistri Knut Klaisi soovitusel tuleks karakssipostide vahele paigaldatud põhupakid vertikaalsuunas kokku suruda kuni 10% kogu paki kõrgusest. Selleks kasutati järgnevaid vahendeid (joonis 26): pingutusseade LOW19, mille maksimaalne pingutusjõud on 200 kg; 19 mm tekstiilist pakkelint ja kinnitusklambreid.



**Joonis 26.** Pingutusseade LOW 19, ilmastikukindel tekstiillint, kinnitusklamber ([www.pakendikeskus.ee](http://www.pakendikeskus.ee))

Välisseinte kõrguseks kulus 6 rida põhupakke, mille tihendamine toimus kahes osas: esimene kord kolmanda rea järel ning teine kord kuuenda rea järel. Tekstiillint paigaldati

osade kaupa üle põhupakkide karkassipostide vahele, mille otsad kinnitati puidukruviga põrandakonstruktsiooni vööprussi külge. Pehme ja elastse põhu tihendamise efektiivsuse tõstmiseks kasutati saematerjali mõõtudega 22x100 mm, mis lisas põhu pinnale jäikust seda kokku surudes. Pingutustööde tulemusena suruti kokku karkassipostide vahele paigaldatud põhupakid verikaalses suunas 7,5 %.

Joonisel 27 on näha saunahoone esimese kolme rea tihendamine, mille käigus 1200 mm kõrgune põhupakkidest sein suruti pingutustööde käigus kokku 90 mm.



**Joonis 27.** Põhupakkide pingutamine seinas ning saavutatud tulemus

Vuugitiheiduse tagamiseks täideti pingutatud pakkide horisontaalvuugid lahtise põhuga. Oluline oli jälgida, et pingutamiseks paigaldatud laud oleksid tihedalt põhuga kaetud ning ei tekiks tühimikke pakkide vahele. Kuna pakkide mõõtmed varieerusid valmistamise, pingutamise ja ladustamise tulemusena, tuli järgneva etapi käigus põhupakke vormida tampimise meetodil. Puidust tambitsad olid ehitustegevuse käigus ise valmistatud ning nendega oli võimalik pakid üksteise suhtes kohakuti paigutada (joonis 28).





**Joonis 28.** Ehitustegevuseks kasutatud puidust tambitsad

Viimaseks ülesandeks oli mootorsaega põhuseinte sise- ja välispindade sirgestamine. Antud töö käigus tuli jälgida, et tekstiillinte läbi ei lõigataks. Protsess oli kiirelt teostatav, sest eelnevalt laotud ja tambitud põhupakid olid piisavalt tihedad ning sirge tasapinnaga. Põhupakkidest soojustatud välisseinte kandekarkassi ruumilise jäikuse tagamiseks paigaldati igasse külge diagonaallaudis 22x100 mm.

Joonisel 29 on näha sirgestamata, variant a) ja sirgestatud, variant b), seinte erinevus.

a)



b)



**Joonis 29.** Põhuseinad enne ja pärast mootorsaega sirgestamist

Ajakulu eelnimetatud tööde (ladumine, tihendamine, trimmimine) teostamiseks oli 3 inimesel kokku 95 tundi (tabeli 8). Arvutuslikult oli põhupakkidest ehitatavat ja paigaldatavat pinda kokku 52 m<sup>2</sup>.

Kokkuvõttes kulgesid põhupakkide varumise, paigaldamise ning soojustamisega seotud ehitustegevused plaanipäraselt ning enamjaolt probleemideta. Enim ajamahukaks osutus optimaalsete põhupakkide leidmine ning nende sobivatesse mõõtudesse kujundamine.

#### 4.4.3 Põhuseinte viimistlemine

Varasemate ehitustööde kogemustel ning kirjanduse läbitöötamise tulemusena otsustati põhuseinte viimistlemisel kasutada savi- ja lubikrohvi: sisetööde teostamiseks nii lubi- kui savikrohvi ning välistingimustes ainult lubikrohvi. Krohvimistööde kvaliteet sõltub nii käsitöö oskustest kui ka sise- ja välisruumide keskkonnatingimustest. Ehitustöödeks kuluva aja kokkuhoidmiseks kasutati jaekaubanduses pakutavaid valmissegatud ning pakendatud kuivseguisid. Valikud olid järgmised:

- HML-4 traditsiooniline lubikrohv, tootjaks Sakret OÜ, segu põhiomadused on toodud tabelis 6.
- Looduslik savikrohv, tootjaks Uninaks AS, segu põhiomadused on toodud tabelis 7.

**Tabel 6.** Lubikrohv Sakret HML-4 ([www.sakret.ee](http://www.sakret.ee))

Põhiomadused	Toimivus	Ühtlustatud tehniline kirjeldus
Täitematerjali terasuurus	kuni 4,0 mm	
Tsemendi sisaldus kuivsegu	0%	
Survetugevus	klass CS I	
Nakketugevus (tab. väärtus)	$\geq 0,15 \text{ N/mm}^2$	EN 997-1
Kapillaarne veeimavus	Klass W0	
Veeauru läbilaskvus $\mu$	$\leq 8$	
Soojuserijuhtivus $\lambda_{10, \text{dry}}$ (tab. väärtus)	$\leq 0,67 \text{ W/(mK)}$ , P=50% $\leq 0,76 \text{ W/(mK)}$ , P=90%	
Tuletundlikus	Klass A1 (mittepõlev)	

**Tabel 7. Looduslik savikrohv Uninaks (www.uninaks.ee)**

Põhiomadused	Toimivus	Ühtlustatud tehniline kirjeldus
Tuletundlikus	$A_{1FL}$	
Veeimavus	$W_2 < 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{h}^{0.5})$	
Veeauru läbilaskvus	$\mu < 10$	EVS-EN 998-1: 2010
Kloriidide sisaldus	$< 0,1\% \text{ Cl}$	
Soojajuhtivus	$0,67 \text{ W/mK}$ (tab.väärtus)	
Ohtlikud koostisosad	Ei	

Krohvimist alustati seinte välispindadest. Selle peamiseks põhjuseks oli ehitustöödeks järjest halvenevad ilmastikutingimused, sealhulgas õhutemperatuuri langus, mis antud toote tingimustes peab olema kõrgem kui 5 °C. Töödeks kasutatav lubikrohv oli pakendatud 25 kg kottidesse. Kuivsegu segati külma veega puhtas 20 liitrisel anumal segumiksriga Rubi Rubimix-9, mille võimsus on 1200W ning reguleeritavad pöörded vastavalt käikudele 180-620 rpm. Kuivsegu segati veega kuni ühtlase massi tekkimiseni. Seejärel lasti mördil kuni 5 minutit seista ning korraldi segamist. 25 kg kuivsegu kohta on tootja andmetel ettenähtud 4,8-5,3 liitrit vett.

Krohvimine toimus kihtide kaupa, mis jagunesid järgmiselt:

- Esimene sisseviskekiht ehk nakkekiht. Segu oli vedela konsistentsiga, millega saavutati võimalikult tihe ja parim nakkuvus kuiva põhuga. Segu kanti aluspinnale käsitsi ning kihi paksus oli kuni 10 mm.
- Teine- ehk täitekiht. Kuivsegu segati vee ja peenestatud põhukiududega. Viimane täitematerjal saadi põhuseinte trimmimise tulemusel. Põhku kasutati mördis eesmärgiga täita krohvitava seina sügavamad ebataasused, millega kaasnes lisaks vajamineva lubikrohvi kokkuhoid. Segu kanti aluspinnale käsitsi ning kihi paksus oli ~10 mm.
- Kolmas- ehk armeerimiskiht. Tööd teostati seinte kaupa. Lubikrohv kanti aluspinnale käsitsi ning kihi paksus oli kuni 10 mm. Seejärel suruti armeerimisvõrk segu sisse nii, et võrgu silmadest läbi tulnud segu siluti laiali. Järgmine paan paigaldati 100 mm ülekatttega. Töodes kasutati klaaskiust armeerimisvõrku silma suurusega 10x10 mm. Võrk paigaldati vertikaalselt ja paani pikkuseks oli krohvitava seina kõrgus.



- Neljas- ehk viimistluskiht. Õhuke lubikrohvi kiht kogu fassaadi ulatuses, millega tasandati väiksemad ebatasasused ning vormiti lõplik pinnastruktuur. Viimistluse töötlemisel kasutati veega niisutatud käsna. Lubikrohvi neljanda kihi paksus oli kuni 10 mm.

Krohvikihide pealekandmisel kasutatavateks tööriistadeks olid müüri- ning viimistluskellud. Nakke soodustamiseks niisutati aluspindu enne iga järgmise kihi lisamist. Enim ajamahukaks etapiks oli esimese kihi krohvimine. Selle põhjuseks oli lubikrohvi kehv nakkuvus põhuga. Krohvipind oli viimistletav juba 12 tunni möödudes.

Joonisel 30 on esitatud Leigo talu saunamaja välisseinte krohvimise 4 etappi.

1.kiht



2.kiht



3.kiht



4.kiht



*Joonis 30. Põhuseinte krohvimine lubikrohviga neljas kihis*

Lubikrohviga viimistlemine sisetingimustes toimus ülal kirjeldatud järjekorras kasutades samu ehitusviise, mis välitöödeski.

Sisepiirete viimistlemise eesmärgiks oli koguda erialaseid teadmisi, võrrelda savi- ja lubikrohvi erinevaid aspekte ning paigaldamise tehnoloogiaid. Erinevate kirjandusallikate läbitöötamisel ning Loodusehituse OÜ meistri Knut Klaisi soovitustest leiti, et savikrohvi optimaalseim viimistlustehnika sarnaneb lubikrohvi omale. Seetõttu paigaldati ning töödeldi antud krohvisegu samade etappide kaupa nagu lubikrohvi.

Saunahoone põhuseinte viimistlemisel kasutati roheka tooniga savikrohvi, pakendatuna 25 kg paberkottides. Kuivsegu segati külma veega puhtas 20 liitrisel anumal segumiksriga Rubi Rubimix-9. Krohvimistöid teostati müüri- ning viimistluskelluga. Valmissegatud segukrohv oli kasutatav ka järgmisel päeval - piisas vajaliku koguse vee juurde lisamisest ning miksriga segamisest.

Puhkeruumi lõppviimistluse saavutamiseks on plaanis kasutada savi peenviimistluskrohvi, mis on peenema teraga ja saavutatav pinnastruktuur on siledam. Vajadusel on leiliruumis paigaldatud savikrohvi võimalik hiljem töödeldakse tadelaktiga, et saavutada pinnale veekindel viimistluskiht.

Savikrohviga saunahoone siseruumides töötamise käigus leiti järgmised iseärasused võrreldes lubikrohviga:

- Savikrohvi nakkuvus oli põhust aluspinnaga parem kui lubikrohvil.
- Segumassi valmistamisele kulus suurem kogus vett - 25 kg kuivsegule lisati 6-7 liitrit.
- Savikrohv vajab pindade kuivamiseks tõhusamat ruumide ventileerimist. Protseduuri kiirendamiseks kasutati niiskusimurit.
- Kuivanud savikrohviga kaetud pindasid on võimalik parandada niisutamise teel, kuid lubikrohvi mitte.
- Erinevate kihtide katmiseks kulus savi- ja lubikrohvi võrdses koguses.

Joonisel 31 on esitatud saunahoone siseseinteseinte krohvimisel savikrohviga 4 etappi.



1. kiht



2. kiht



3. kiht



4. kiht



*Joonis 31. Põhuseinte krohvimine savikrohviga neljas kihis*

#### **4.5 Leigo talu saunahoone ehitustegevusega seotud kulud**

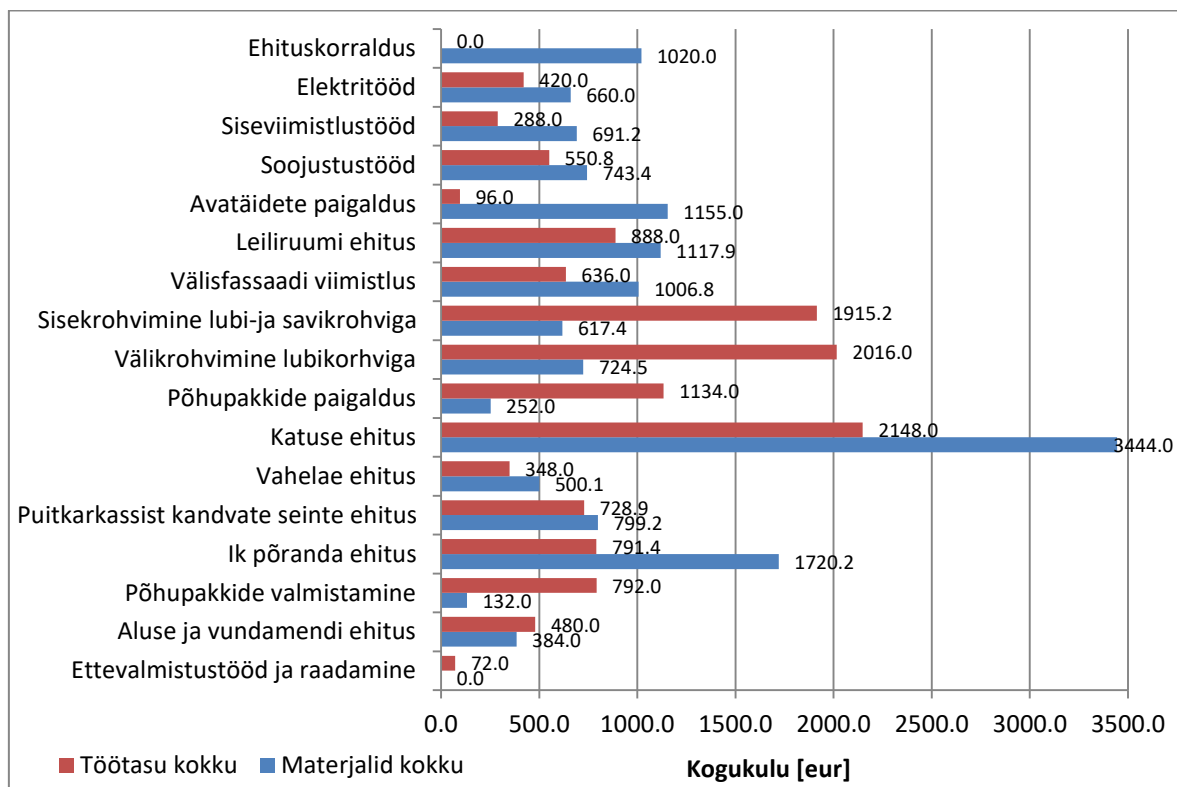
Leigo talu saunahoone ehitustegevusega seotud kulud (tabel 8) olid autorite kanda. Ehitustöid aitasid finantseerida ka ehitusettevõtted Mivo Ehitus OÜ ja pH7 OÜ. Saunahoones kasutatud materjal ning tööde teostamise aeg on dokumenteeritud vastavalt ehitamise dokumenteerimise üldnõuetele. Kõik saunahoonega seotud ehitustööd on teostanud Andres Jürgenson, Rain Allikmäe ja Leigo talu peremees Taavet Tamm.

**Tabel 8. Saunahoone ehitustegevusega seotud kulud**

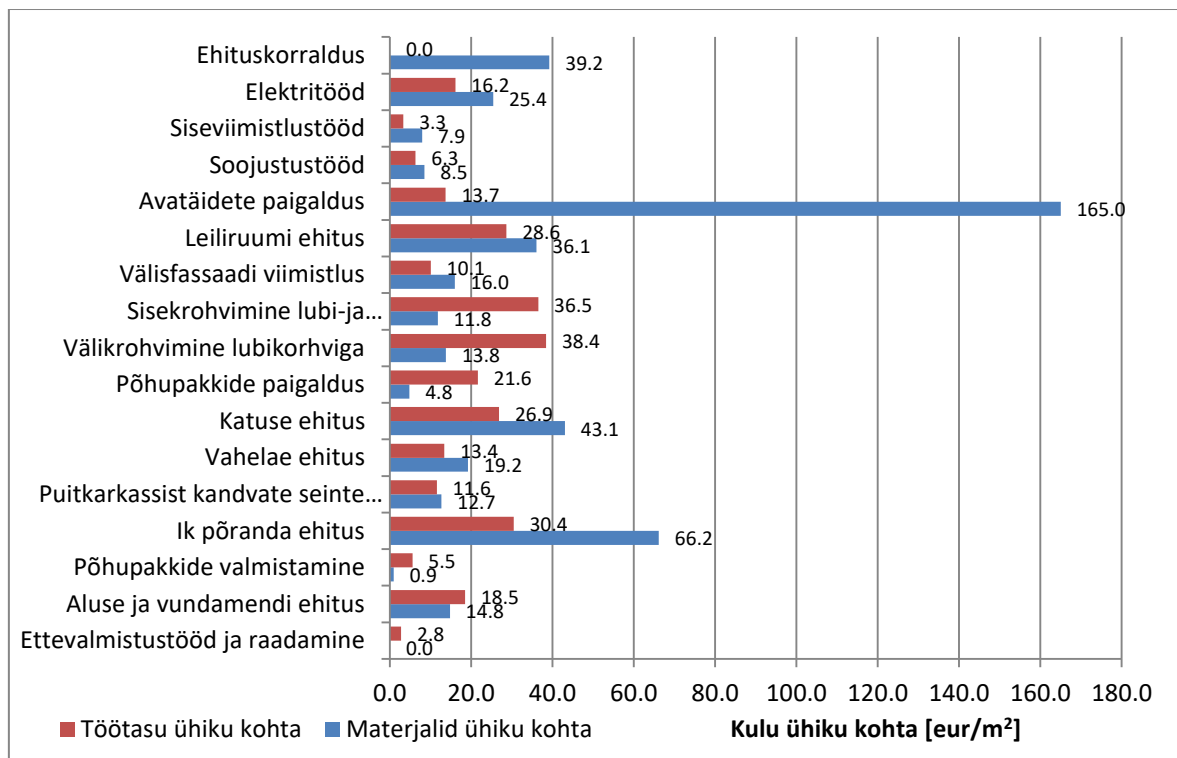
Nr	Töö etapp	Materjal		Töötasu		Tööaeg tundides	
		kokku	ühiku kohta	kokku	ühiku kohta	kokku	ühiku kohta
		[eur]	[eur/m <sup>2</sup> ]	[eur]	eur/m <sup>2</sup>	[h]	[h/m <sup>2</sup> ]
1	Ettevalmistustööd ja raadamine	0.0	0.0	60.0	2.3	6	0.2
2	Aluse ja vundamendi ehitus	320.0	12.3	400.0	15.4	40	1.5
3	Põhupakkide valmistamine	110.0	0.8	660.0	4.6	66	0.5
4	I k põranda ehitus	1433.5	55.1	659.5	25.4	66	2.5
5	Puitkarkassist kandvate seinte ehitus	666.0	10.6	607.4	9.6	51	0.8
6	Vahelae ehitus	416.8	16.0	290.0	11.2	29	1.1
7	Katuse ehitus	2870.0	35.9	1790.0	22.4	179	2.2
8	Põhupakkide paigaldus	210.0	4.0	945.0	18.0	95	1.8
9	Välikrohvimine lubikorhviga	603.8	11.5	1680.0	32.0	168	3.2
10	Sisekrohvimine lubi- ja savikrohviga	514.5	9.8	1596.0	30.4	160	3.0
11	Välisfassaadi viimistlus	839.0	13.3	530.0	8.4	53	0.8
12	Leiliruumi ehitus	931.6	30.1	740.0	23.9	73	2.4
13	Avatäidete paigaldus	962.5	137.5	80.0	11.4	8	1.1
14	Soojustustööd	619.5	7.1	459.0	5.2	46	0.5
15	Siseviimistlustööd	576.0	6.6	240.0	2.7	34	0.4
16	Elektritööd	550.0	21.2	350.0	13.5	35	1.3
17	Ehituskorraldus	850.0	32.7	0.0	0.0	0	0.0
	<b>KOKKU</b>	<b>12473.1</b>	<b>eur</b>	<b>11086.9</b>	<b>eur</b>	<b>1109</b>	<b>h</b>
	<b>KM 20%</b>	<b>2494.6</b>	<b>eur</b>	<b>2217.4</b>	<b>eur</b>		
	<b>KOKKU KM-ga</b>	<b>14967.7</b>	<b>eur</b>	<b>13304.3</b>	<b>eur</b>		

Tabeli 8 põhjal on näha, et saunahoone materjalide kulu kogu hoone ehitusel oli 14967,7 eurot, mis moodustab katsehoone ehitusmaksumusest 53 %. Kogu maksumusest moodustas tööjõukulu 47 % ehk 13304,3 eurot. Kokku kulus katsehoone ehitamiseks 1109 töötundi, kus ühe töötunni maksumuseks on arvestatud 10 eur/h.

Ehitustegevusega seotud kulud on esitatud joonistel 32 ja 33:

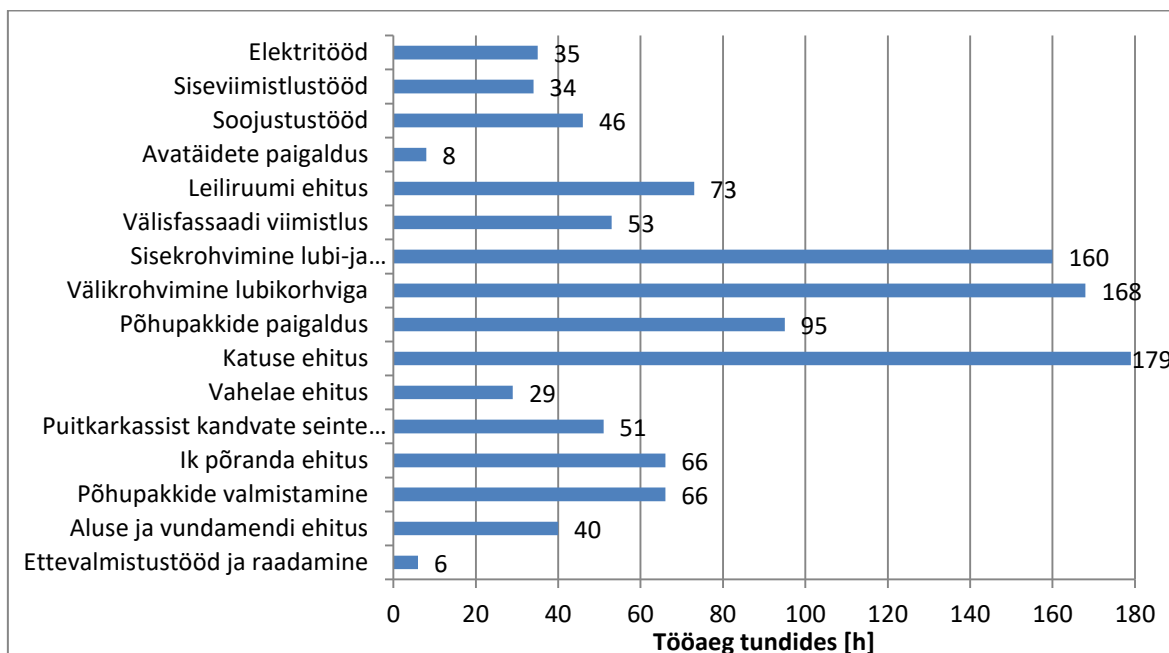


**Joonis 32.** Leigo talu saunahoone ehituskulud kokku

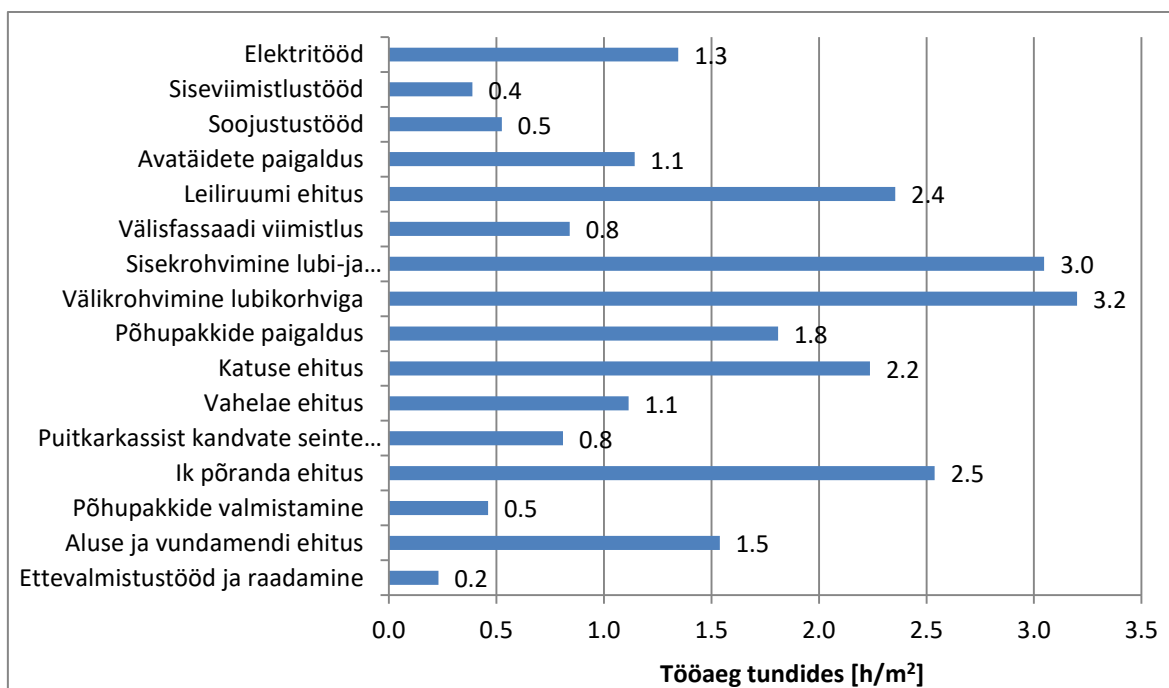


**Joonis 33.** Leigo talu saunahoone ehituskulud ühele ruutmeetrile

Ehitustegevuseks kulunud tööaeg on esitatud joonistel 34 ja 35:



**Joonis 34.** Leigo talu saunahoone tööajakulu tundides kokku



**Joonis 35.** Leigo talu saunahoone tööajakulu tundides ühele ruutmeetrile

Jooniselt 32 on näha, et katsehoone ehitamisel kõige suurem kuluartikkel oli katuse ehitus, maksumusega 5592 eurot, mis sisaldas materjali kulu 3444 eurot ning tööjõukulu 2148 eurot. Samuti ehitusmaksumusest olulise osa moodustas põhupakkide krohvimine seest ja

väljast lubi- ja savikrohviga, kus tööjõu hinnaks kujunes 3931,2 eurot ja materjali maksumuseks 1341,9 eurot. Vastavalt joonistele 32 ja 33 kulus katsehoone ehituseks vajaminevate põhupakkide varumiseks ja valmistamiseks kokku 924 eurot, mis teeb ühe ruutmeetri kohta 6,4 eurot. Põhupakkide paigalduse maksumus ühe ruutmeetri kohta välisseinte soojustamisel oli 26,4 eurot, millest suurema osa moodustab tööjõukulu 21,6 eur/m<sup>2</sup>. Kui teostada kõik toimingud ja ehitustööd nii põhupakkide varumisel kui paigaldamisel iseseisvalt, ilma lisatööjõudu kasutamata, siis saavutatakse sellega oluline ühikhinna ja kogumaksumuse kokkuhoid.

Kõige ajamahukam protsess põhupakkidest katsehoone ehitamisel oli välisseinte krohvimine väljast ja seest lubi- ning savikrohviga. Antud töödele kulus kokku 328 töötundi inimese kohta, mis nelja kihi krohvimiseks teeb keskmiselt 3,1 h/m<sup>2</sup>. Kandvate puitkarkassist välisseinte püstitamine võttis aega 51 tundi, tehes ühiku maksumuseks 0,8 eur/m<sup>2</sup>, mis moodustab põhupakkidest soojustatud ja krohviga viimistletud välisseinte ehituseks kulunud ajast 10,76 %.

#### **4.6 Leigo talu saunahoone ehitusmaterjalide sisendenergia**

Pöörates tähelepanu keskkonnasäästliku ehituse propageerimisele on töö autorid katsehoone kasutatava materjali valikul arvestanud selle sisendenergiamahukust. Hoone projekteerimise faasis on kalkuleeritud materjalis sisalduva energia hulka, mida on kulutatud viimase hankimiseks, paigalduseks, valmistamiseks ja transpordiks.

Tänapäeval on materjalide energiasisalduse määramise kiire areng aidanud mõista hoonete ehitamisel ja eksploatatsioonil kasutatava energiahulga vähendamise tähtsust. Energiamahukuse määramisel on oluline arvestada hoone ehitamiseks ning haldamiseks kuluvat energiat. Materjalitööstuses kasutatavad tootmise ning transpordi tehnoloogiad on erinevad, mistõttu info andmete kohta on varieeruv. Hoone konstruktsioonide energiasisalduse määramiseks kasutatakse erinevaid arvutusmeetodeid. (Miljan 2012: 6) Kolm peamist viisi on (Best, de Valence 2002; Mithraratne *et al.* 2007 ref Miljan 2012: 6):

- **Protsessi-analüüsi meetod** – kõige täpsem arvutusmeetod, mille puhul arvestatakse materjali tootmiseks võimalikult täpselt kõik enrgiatarbijad. Antud analüüsi teeb keeruliseks ning aeganõudvaks asjaolu, et võimalikult täpse analüüsi teostamiseks on probleem usaldusväärse info kättesamine erinevatelt tootja tehastelt.

- **Sisend-väljund meetod** – lihtsam ning mitte kõige täpsem matemaatiline meetod, milles kasutatakse elektri ning kütuse statistikaandmeid energiakulu arvutamiseks. Info on kättesaadav ning arvutuskäik suhteliselt lihtne. Näiteks on tulemise arvutamiseks toormaterjali ning valmistoote hinna vahe, mis on aluseks energiakulu määramisel.
- **Kombineeritud meetod** – on kahe eelnimetatud meetodi kombineeritud tulem.

Ehitusmaterjalide energisisaldus on määratav kahes vormis (Best, de Valence 2002; Mithraratne *et al.* 2007 ref Miljan 2012: 7):

- **Primaarenergia** – materjali tootmisest kuni paigalduseni kuluv mittetaastuv energiahulk, mis jaguneb kaheks: a) otsene energia, mis kulub materjali objektile tarneks ning paigalduseks; b) kaudne energia, mis on seotud toorme hankimiseks, töötlemiseks, tootmiseks ning turustamiseks.
- **Ekspluatatsiooniennergia** – energia hulk, mis on kasutamise käigus kulutatud materjali hooldamiseks või asendamiseks hoone eluea jooksul.

Inglismaal Bathi ülikoolis läbiviidud uurimuses käsitletakse kogutud andmete põhjal primaarenergiasisalduse leidmist kolmel viisil (Hammond, Jones 2008 ref Miljan 2012: 7):

- **Hällist-hauani meetod** – täpne ning mahukas meetod, mille energiakulu arvutamisel võetakse arvesse kõik protsessid toorme hankimisest kuni kasutusest kõrvaldamiseni.
- **Hällist-väravani meetod** – antud meetodil arvestatakse energiakulu arvutamisel kõiki protsesse kuni tehasest lahkumiseni.
- **Hällist-platsile meetod** – arvutatakse kogu energiakulu materjali ehitusobjektile jõudmiseni.

Transpordile kuluv energiahulk on hoonete ehituses väga suure osakaaluga, mille hulk primaarenergiasisalduses sõltub objekti asukohast kui ka materjali kogustest. Energiakulu varieerub transpordivahendi liigist, mis võib moodustada Berge ja Henley (2009) väitel kuni 20 % hoone ehitamiseks kasutatud kogu kulust. (Miljan 2012: 7-8)

Leigo talu saunahoone ehitusmaterjalie sisendenergia leidmiseks on kasutatud „hällist-väravani“ meetodit, sest transpordiks kuluv energia on suurel määral varieeruv. Alltoodud tabelites „Energikulu ühiku kohta“ väärtused on võetud Mihkel Teori Eesti Maaülikooli

maachituse õppekava magistritööst „Ehitusmaterjalide ja tarindite sisendenergia“ (Teor 2016). Energiakulu mõõdetakse üldiselt kWh või MJ, kus 1 kWh on võrdne 3,6 MJ.

**Tabel 9.** Kandvate väliseinte ehitusmaterjalide sisendenergia

Materjal	Kihi paksus [m]	Ühik	Kogus	Energiakulu [MJ] ühiku kohta	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]	Energiakulu [MJ]
Lubikrohv	0.04	kg	56.00	1.39	1400	77.84
Puitkarkass 50x100mm	0.1	kg	4.64	3.92	450	18.19
Põhupakk 650x500x400mm	0.500	kg	50.00	0.24	100	12.00
Lubikrohv	0.04	kg	56.00	1.39	1400	38.92
Savikrohv	0.04	kg	80.00	0.09	2000	3.60
<b>KOKKU</b>						<b>150.55</b>

**Tabel 10.** 1. korruse põranda ehitusmaterjalide sisendenergia

Materjal	Kihi paksus [m]	Ühik	Kogus	Energiakulu [MJ] ühiku kohta	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]	Energiakulu [MJ]
Vineer 15mm	0.015	kg	10.50	10.40*	700	109.20
Distsantsliist 22x50mm	0.022	kg	0.83	3.92	450	3.25
Tuuletõkkemembraan	-	m <sup>2</sup>	1.00	13.94	-	13.94
Põrandatalad 45x195mm s:600	0.195	kg	9.42	3.92	450	36.91
Mineraalvill 200mm	0.20	kg	4.00	43.00	20	172.00
Aurutõkkemembraan	-	m <sup>2</sup>	1.00	10.80	-	10.80
Distsantsliist 22x50mm	0.022	kg	0.83	3.92	450	3.25
Põrandalaud 20x145mm	0.02	kg	9.00	3.92	450	35.28
Betoon	0.02	kg	47.96	0.86	2400	41.24
Hüdrolatsioon	-	m <sup>2</sup>	1.00	3.7	-	3.70
Keraamiline põrandapalaat	-	m <sup>2</sup>	1.00	269.9	-	269.90
<b>KOKKU</b>						<b>699.48</b>

\* andmed pärinevad: [www.bioneer.ee/eluviis/tarbimine/aid-586/Erinevad-materjalid-kulutavad-erinevalt-energiat](http://www.bioneer.ee/eluviis/tarbimine/aid-586/Erinevad-materjalid-kulutavad-erinevalt-energiat)

**Tabel 11. Otsaviilude ehitusmaterjalie sisendenergia**

Materjal	Kihi paksus [m]	Ühik	Kogus	Energiakulu [MJ] ühiku kohta	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]	Energiakulu [MJ]
Voodrilaud	0.018	kg	9.00	3.92	450	35.28
Distantслиist 22x50mm	0.022	kg	0.83	3.92	450	3.25
Tuuletõkkeplaat	0.013	kg	0.26	43.00	20	11.18
Puitkarkass 50x100mm	0.1	kg	4.64	3.92	450	18.19
Puitroov 50x50mm	0.05	kg	2.32	3.92	450	9.09
Minaeralvill 150mm	0.15	kg	3.00	43.00	20	129.00
Aurutõkkemembraan	-	m <sup>2</sup>	1.00	10.80	-	10.80
Distantслиist 22x50mm	0.022	kg	0.83	3.92	450	3.25
Voodrilaud	0.018	kg	9.00	3.92	450	35.28
<b>KOKKU</b>						<b>255.33</b>

**Tabel 12. Vahelae ehitusmaterjalide sisendenergia**

Materjal	Kihi paksus [m]	Ühik	Kogus	Energiakulu [MJ] ühiku kohta	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]	Energiakulu [MJ]
Vahealetalad 45x145mm s:600	0.145	kg	4.90	3.92	450	19.21
OSB plaat 18mm	0.018	kg	11.70	16.00	650	187.20
<b>KOKKU</b>						<b>206.41</b>

**Tabel 13. Katuse ehitusmaterjalide sisendenergia**

Materjal	Kihi paksus [m]	Ühik	Kogus	Energiakulu [MJ] ühiku kohta	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]	Energiakulu [MJ]
Katusekivi	-	m <sup>2</sup>	1.00	96.90*	-	96.90
Puitroov 50x50mm	0.05	kg	3.52	3.92	450	13.80
Distantслиist 22x50mm	0.022	kg	0.83	3.92	450	3.25
Hingav aluskate	-	m <sup>2</sup>	1.00	13.94	-	13.94
Sarikad 45x145mm	0.145	kg	6.60	3.92	450	25.87
Minaeralvill 150mm	0.15	kg	3.00	43.00	20	129.00
Aurutõkkemembraan	-	m <sup>2</sup>	1.00	10.80	-	10.80
Distantслиist 22x50mm	0.022	kg	0.83	3.92	450	3.25
Voodrilaud	0.018	kg	9.00	3.92	450	35.28
<b>KOKKU</b>						<b>332.10</b>

\* andmed pärinevad: [www.eby.ee/raamat/Pilliroo\\_kasutamine.pdf](http://www.eby.ee/raamat/Pilliroo_kasutamine.pdf)



**Tabel 14.** Puitkarkassist vaheseina ehitusmaterjalide sisendenergia

Materjal	Kihi paksus [m]	Ühik	Kogus	Energiakulu [MJ] ühiku kohta	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]	Energiakulu [MJ]
Voodrilaud	0.018	kg	9.00	3.92	450	35.28
Distantслиist 22x50mm	0.022	kg	0.83	3.92	450	3.25
Aurutökkemembraan	-	m <sup>2</sup>	1.00	10.80	-	10.80
Puitkarkass 50x100mm	0.1	kg	4.64	3.92	450	18.19
Mineraalvill 100mm	0.10	kg	2.00	43.00	20	86.00
Aurutökkemembraan	-	m <sup>2</sup>	1.00	10.80	-	10.80
Distantслиist 22x50mm	0.022	kg	0.83	3.92	450	3.25
Voodrilaud	0.018	kg	9.00	3.92	450	35.28
<b>KOKKU</b>						<b>202.86</b>

**Tabel 15.** Vundamendi ehitusmaterjalide sisendenergia

Materjal	Kihi paksus [m]	Ühik	Kogus	Energiakulu [MJ] ühiku kohta	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]	Energiakulu [MJ]
Betoon C25/30	0.16	kg	36.92	0.86	2400	31.75
Liiv	-	m <sup>3</sup>	0.04	0.08	1700	0.003
<b>KOKKU</b>						<b>31.76</b>

**Tabel 16.** Leigo talu kogu saunahoone ehitusmaterjalide sisendenergia

Konstruktsioon	Energiakulu	Tarindi pindala	Sisendenergia		Osakaal
	[MJ/m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[MJ]	[kWh]	[%]
Postvundamendid	31.76	26	825.68	229.36	1.31
Põrandad	699.48	26	18186.56	5051.82	28.84
Välisseinad	150.55	52.5	7903.81	2195.50	12.54
Sisesein	202.86	7.5	1521.42	422.62	2.41
Vahelagi	206.41	26	5366.61	1490.72	8.51
Otsakelbad	255.33	10.5	2680.97	744.71	4.25
Katus	332.10	80	26567.81	7379.95	42.14
<b>KOKKU</b>	<b>1878.48</b>		<b>63052.86</b>	<b>17514.7</b>	<b>100.00</b>

Tabelist 16 on näha, et katsehoone ehitustööde juures kõige suurema ehitusmaterjalide sisendenergia osakaalu moodustab katuse ehitus 42,14 %. Samas on kandva puittarindusega põhupakkidega soojustatud välisseinte ehitusmaterjalide sisendenergia osakaal kogu mahust 12,54 % ehk 150,55 MJ /m<sup>2</sup> (41,82 kWh/m<sup>2</sup>). Ehitusmaterjali sisendenergia kogu hoone ehitusel on 63052,86 MJ (17514,7 kWh).

## **5. PÕHUPAKKIDEST SAUNAHOONE**

### **EHITUSFÜÜSIKALISED MÕÕTMISED LEIGO TALUS**

#### **5.1 Mõõtmiste eesmärk**

Leigo tallu ehitatud puitkarkassist ning põhupakkidega soojustatud seintega saunahoone ehitusfüüsikaliste mõõtmiste eesmärk oli mõõtmistulemuste põhjal määrata välisseinte soojusläbivus ning niiskusrežiim erinevate niiskuskooormustega ruumides ja hinnata saadud tulemuste põhjal antud piirdetarindi sobivust. Sellega seoses oli ülesandeks hinnata ka antud seinakonstruktsiooni sobivust leiliruumi ehitamisel, kus sauna kütmisel on tegemist kõrgete temperatuuri- ja niiskuskooormustega. Ühtlasi oli oluline võrrelda reaalses konstruktsioonis ning ümbritseva keskkonna dünaamilistes tingimustes tehtud mõõtmistulemusi statsionaarsetes tingimustes leitud arvutuslike tulemustega.

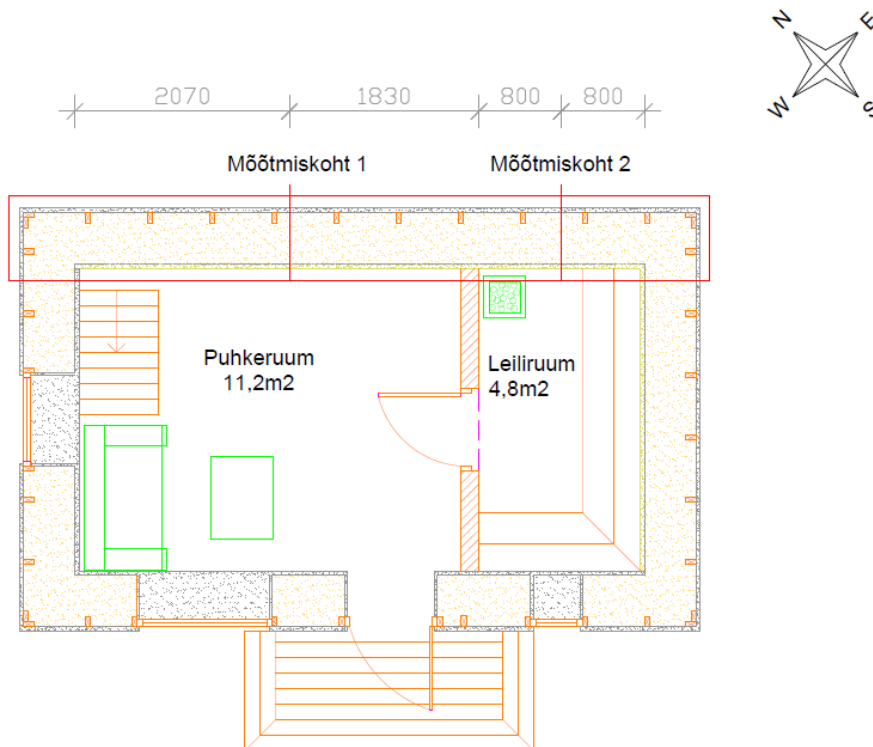
Kuna põhupakkidega saunahoone ehitusperiood sõltub soojustuseks kasutatava toormaterjali kättesaadavuse ajast, mis omakorda sõltub viljakoristuse perioodist, siis oli üheks eesmärgiks koguda infot ka ehitustegevusest (seinte krohvimine) tingitud suurest ehitusniiskuse mõjust seinakonstruktsioonile. Sõltuvalt väliskliima tingimustest (sademete hulk, õhutemperatuur jne) toimub viljakoristus Eestis tavaliselt augusti kuu jooksul ning põhupakkide valmistamiseks vajalikku põhku saab seega alles suve lõpus. Kui puudub võimalus põhupakkide ladustamiseks ja ehitustööde teostamiseks kevad-suve perioodil, siis põhupakkidest hoonete ehitamisel sügisperioodil jääb ehitusniiskuse välja kuivamiseks vähe aega. Seega sügisperioodil ehitatud ja sise- ja välisviimistlusel lubi- või savikrohviga viimistlemisel on põhupakkidest piirdekonstruktsioonide niiskusesisaldus kütteperioodiks oluliselt suurem kui kevad-suveperioodil ehitatud hoonetel.

#### **5.2 Mõõteseadmete ja metoodika kirjeldus**

Leigo talu saunahoone välisseinakonstruktsioon koosneb põhupakkidest mõõtmitega 650 x 500 x 400 mm, kus 650 mm on põhupaki pikkus, 500 mm on põhupaki laius ja 400mm on põhupaki kõrgus. Põhupakid laoti lapiti eelpool kirjeldatud meetodil tihedalt puidust karkassipostide vahele ning välisviimistluseks kasutati ainult „Sakreti“ lubikorohvi HML-4 ja siseviimistluseks „Sakreti“ lubikorohvi HML-4 ja „Uninaksi“ savikrohvi roheline tooniga. Seestpoolt välisseinte krohvimisel viimistleti üks külje- ja otsasein savikrohviga

ning üks külje- ja otsasein lubikrohviga. Nii sise- kui ka väliskrohv (lubi- ja savikrohv) kanti peale neljas järjestikus kihis ning krohvikihi keskmine lõplik paksus sees ja väljas on ~4 cm. Seega välisseina kogupaksuseks võib võtta 58 cm, kus 4 cm on sisekrohvi (lubi- või savikrohvi) paksus, 50 cm on põhupaki laius ja 4 cm on väliskrohvi (lubikrohvi) paksus.

Ehitusfüüsikalisi parameetreid mõõdeti Leigo talu saunahoone kirdepoolses seinas, mis oli sademete ja otsese päiksevalguse peale langemise eest hästi kaitstud laia katuseräästaga ning hoone suurte puude varju all paiknemisega. Mõõdetav põhupakkidest sein on väljast viimistletud 4cm lubikrohviga ja seest 4cm savikrohviga. Mõõtmisi teostati saunahoone puhkeruumis ehk mõõtmiskohas 1 ja leiliruumis ehk mõõtmiskoht 2 (joonis 36). Mõõtmisperiood oli ajavahemikul 29.12.2016 kuni 21.04.2017 30 minutilise intervalliga ning ajavahemikul 21.04.2017 kuni 24.04.2017 1 minutilise intervalliga. Leiliruumi kütmisperiood oli 21.02.2017 kuni 21.04.2017, kus sauna köeti: 21.02.2017; 25.02.2017; 26.02.2017; 02.03.2017; 11.03.2017; 18.03.2017; 25.03.2017; 02.04.2017; 09.04.2017; 15.04.2017 ja 21.04.2017. Sauna kütmisel visati kõikidel kütiskordadel leili 2,5 liitrit. Leiliruumi kütmine toimus orienteeruvalt korra nädalas, et jäljendada saunas käimise tihedust keskmises üksikelamus.

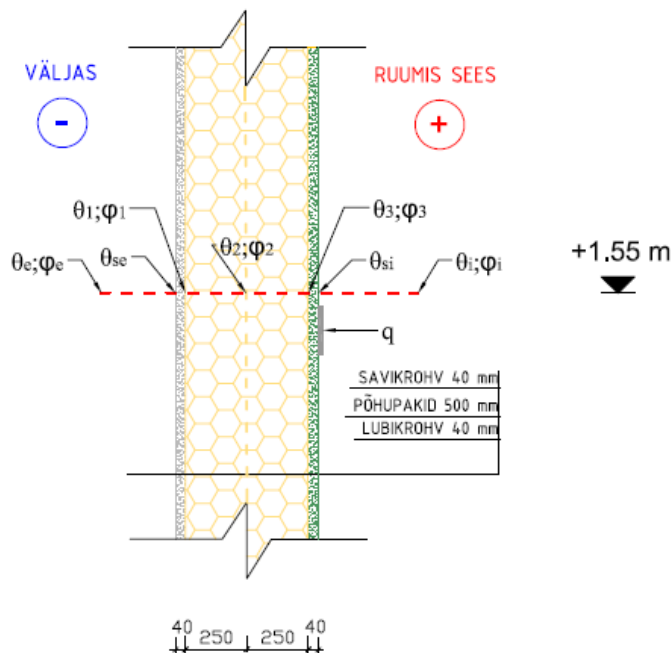


**Joonis 36.** Saunahoone välisseina ehitusfüüsikaliste parameetrite mõõtmiste asukohad.

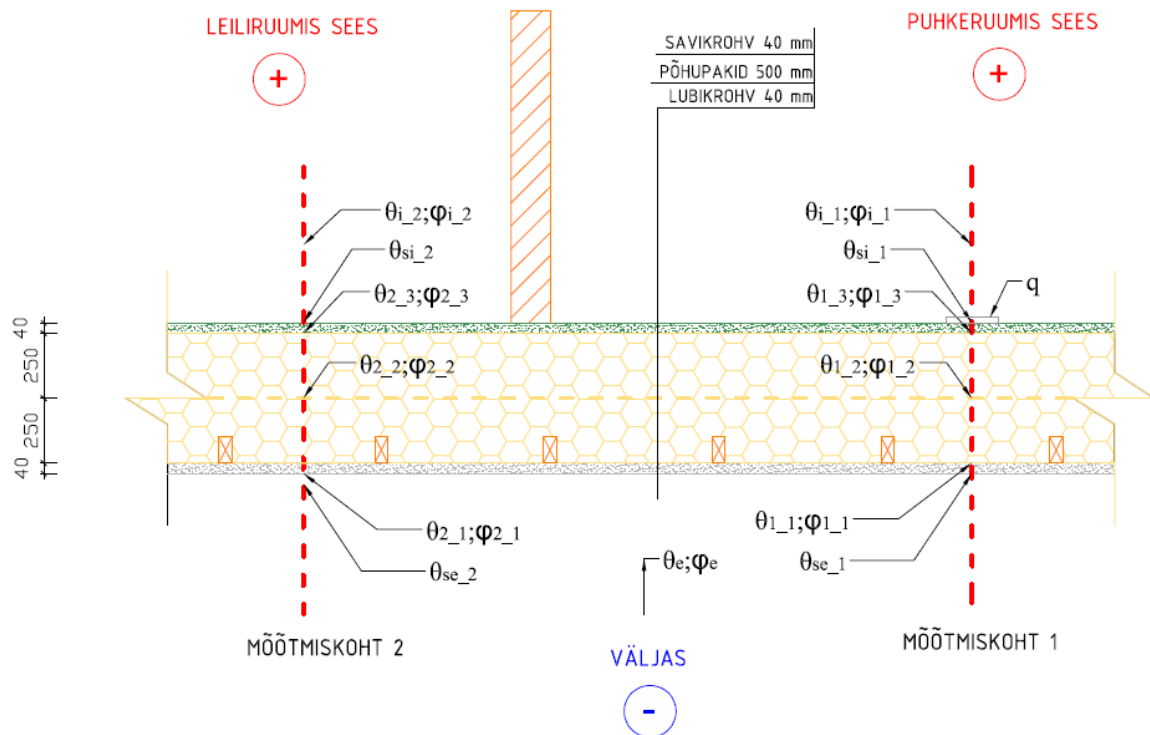
Saunahoone puhkeruumi ja leiliruumi välisseina soojuslähivuse ja niiskusražiimi määramiseks ning arvutamiseks mõõdeti järgmisi parameetreid:

- $\theta_e$  – välistemperatuur °C;
- $\theta_{se\_1}$  – välistemperatuur seina pinnal mõõtmiskohas 1 °C;
- $\theta_{se\_2}$  – välistemperatuur seina pinnal mõõtmiskohas 2 °C;
- $\varphi_e$  – välisõhu suhteline niiskus %;
- $\theta_{i\_1}$  – sisetemperatuur mõõtmiskohas 1 (puhkeruumis) °C;
- $\theta_{i\_1u}$  – sisetemperatuur mõõtmiskohas 1 (puhkeruumis) ruumi lae all °C;
- $\theta_{i\_2}$  – sisetemperatuur mõõtmiskohas 2 (leiliruumis) °C;
- $\theta_{i\_2u}$  – sisetemperatuur mõõtmiskohas 2 (leiliruumis) ruumi lae all °C;
- $\theta_{si\_1}$  – sisetemperatuur seina pinnal mõõtmiskohas 1 (puhkeruumis) °C;
- $\theta_{si\_2}$  – sisetemperatuur seina pinnal mõõtmiskohas 2 (leiliruumis) °C;
- $\varphi_{i\_1}$  – siseõhu suhteline niiskus mõõtmiskohas 1 (puhkeruumis) %;
- $\varphi_{i\_2}$  – siseõhu suhteline niiskus mõõtmiskohas 2 (leiliruumis) %;
- $\theta_{1\_1}$  – temperatuur väliskrohvi ja põhupaki vahel mõõtmiskohas 1 (puhkeruumis) °C;
- $\theta_{1\_2}$  – temperatuur põhupaki keskel mõõtmiskohas 1 (puhkeruumis) °C;
- $\theta_{1\_3}$  – temperatuur sisekrohvi ja põhupaki vahel mõõtmiskohas 1 (puhkeruumis) °C;
- $\theta_{2\_1}$  – temperatuur väliskrohvi ja põhupaki vahel mõõtmiskohas 2 (leiliruumis) °C;
- $\theta_{2\_2}$  – temperatuur põhupaki keskel mõõtmiskohas 2 (leiliruumis) °C;
- $\theta_{2\_3}$  – temperatuur sisekrohvi ja põhupaki vahel mõõtmiskohas 2 (leiliruumis) °C;
- $\varphi_{1\_1}$  – suhteline õhuniiskus väliskrohvi ja põhupaki vahel mõõtmiskohas 1 (puhkeruumis) %;
- $\varphi_{1\_2}$  – suhteline õhuniiskus põhupaki keskel mõõtmiskohas 1 (puhkeruumis) %;
- $\varphi_{1\_3}$  – suhteline õhuniiskust sisekrohvi ja põhupaki vahel mõõtmiskohas 1 (puhkeruumis) %;
- $\varphi_{2\_1}$  – suhteline õhuniiskust väliskrohvi ja põhupaki vahel mõõtmiskohas 2 (leiliruumis) %;
- $\varphi_{2\_2}$  – suhteline õhuniiskus põhupaki keskel mõõtmiskohas 2 (leiliruumis) %;
- $\varphi_{2\_3}$  – suhteline õhuniiskust sisekrohvi ja põhupaki vahel mõõtmiskohas 2 (leiliruumis) %;
- $q$  – soojusvoogu mõõtmiskohas 1 (puhkeruumis) W/m<sup>2</sup>.

Uuritava seina ristlõige ja andurite paigalduskõrgus on hoone sisepõrandast mõõdetuna 155 cm. Joonistel 37 ja 38 on toodud vajalike parameetrite mõõtmiseks paigaldatud andurite asukohad.



**Joonis 37.** Saunahoone uuritava välisseina vertikaalne ristlõige mõõtepunktidega.



**Joonis 38.** Saunahoone uuritava välisseina horisontaalne ristlõige mõõtepunktidega.

Välis temperatuuri ( $\theta_e$ ) ja välisõhu suhtelist õhuniiskust ( $\phi_e$ ), puhkeruumi sisetemperatuuri ( $\theta_{i_1}$ ;  $\theta_{i_{1u}}$ ) ja suhtelist õhuniiskust ( $\phi_{i_1}$ ;  $\phi_{i_{1u}}$ ), leiliruumi sisetemperatuuri ( $\theta_{i_2}$ ) ja suhtelist õhuniiskust ( $\phi_{i_2}$ ), mõõdeti „Hobo U12-011“ andmesalvestiga (joonis 39), mis võimaldab mõõta suhtelist õhu niiskust vahemikus 5 % kuni 95 % ja temperatuuri mõõtepiirkond jääb  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$  vahele. Andmesalvestil on mälu 43000 mõõteväärtuse salvestamiseks ning mõõtmistulemuste tihedust saab seadistada vahemikus 1 sek kuni 18 h. „Hobo U12-011“ mõõtmistäpsus temperatuurid mõõtmisel vahemikus  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  on  $0,035\text{ }^{\circ}\text{C}$  ning õhu suhtelise niiskuse mõõtmisel vahemikus 10 % kuni 90 % on 2,5 %. (www.onsetcomp.com)

Välis temperatuuri seinapinnal mõõtmiskohtades 1 ( $\theta_{se_1}$ ) ja 2 ( $\theta_{se_2}$ ) ning võrdluseks veel välisõhu temperatuuri ( $\theta_e$ ) mõõdeti „TMC6-HD“ temperatuurianduritega (joonis 39), mis on mõeldud kasutamiseks koos „Hobo U12-006“ andmesalvestiga (joonis 39), kus on 4 lisasisendit väliste andurite ühendamiseks. Õhu temperatuuri mõõtmisel jääb „TMC6-HD“ temperatuuriandurite mõõtmispiirkond vahemikku  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ning mõõtmistäpsus koos „Hobo U12-006“ andmesalvestiga temperatuuride vahemikus  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  on  $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . „Hobo U12“ tüüpi andmesalvestid on varustatud USB liidesega, mis võimaldab neid seadistada ja andmeid koguda läbi arvuti. (www.onsetcomp.com)

a)

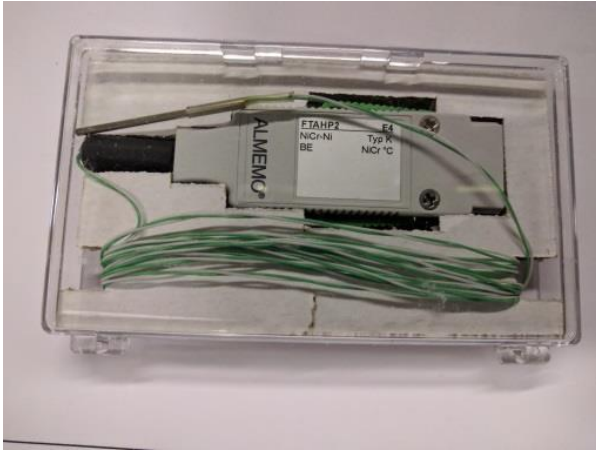
b)

c)



**Joonis 39.** U12 tüüpi andmesalvestid ja väline temperatuuriandur: a) Hobo U12-011; b) Hobo U12-006; c) temperatuuriandur TMC6-HD (www.onsetcomp.com).

Puhkeruumi ( $\theta_{si_1}$ ) ja leiliruumi ( $\theta_{si_2}$ ) sisetemperatuuri sein pinnal mõõdeti NiCr-Ni T190-1 temperatuurianduriga (joonis 40), mis mõõdab temperatuuri vahemikus  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$  ning on varustatud ALMEMO® pistikuga. (www.ahlborn.com)



**Joonis 40.** Temperatuuriandur NiCr-Ni T190-1 ([www.linkedin.com](http://www.linkedin.com)).

Puhkeruumi ( $\theta_{1_1}$ ;  $\theta_{1_2}$ ;  $\theta_{1_3}$ ) ja leiliruumi ( $\theta_{2_1}$ ;  $\theta_{2_2}$ ;  $\theta_{2_3}$ ) temperatuure ning puhkeruumi ( $\varphi_{1_1}$ ;  $\varphi_{1_2}$ ;  $\varphi_{1_3}$ ) ja leiliruumi ( $\varphi_{2_1}$ ;  $\varphi_{2_2}$ ;  $\varphi_{2_3}$ ) suhtelist õhuniiskust välisseinatarindis mõõdeti „FHA 646 R“ komplektsete temperatuuri- ja niiskusanduritega (joonis 41), mis võimaldavad mõõta õhu suhtelist niiskust vahemikus 5 % kuni 98 % ja temperatuuri mõõtepiirkond jääb  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  vahele. „FHA 646 R“ mõõtmistäpsus temperatuuri mõõtmisel vahemikus  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  on  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$  on  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  on  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ning õhu suhtelise niiskuse mõõtmisel vahemikus 0 % kuni 90 % on 2 %. „FHA 646 R“ andurid on varustatud ALMEMO® pistikutega ([www.ahlborn.com](http://www.ahlborn.com))



**Joonis 41.** Temperatuuri- ja niiskusandur FHA 646 R Leigo talu saunahoone sisekrohvi ja põhupakki vahel (autorite foto)

Soojusvoogu puhkeruumis läbi välisseinatarindi mõõdeti  $120 \times 120 \times 1,5\text{ mm}$  silikoonist soojusvooplaadiga „FQA A018 CSI“, mille töötemperatuur jääb vahemikku  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$  ning mõõtmistäpsus  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  juures on 5 %. Soojusvooplaat on varustatud ALMEMO® pistikuga. ([www.ahlborn.com](http://www.ahlborn.com))



**Joonis 42.** Saunahoone puhkeruumi välisseina soojusvoo mõõtmine soojusvooplaadiga FQA A018

Temperatuure sein pinnal ( $\theta_{si\_1}$ ;  $\theta_{si\_2}$ ) ja suhtelist õhuniiskust ( $\phi_{1\_1}$ ;  $\phi_{1\_2}$ ;  $\phi_{1\_3}$ ;  $\phi_{2\_1}$ ;  $\phi_{2\_2}$ ;  $\phi_{2\_3}$ ) ning temperatuure ( $\theta_{1\_1}$ ;  $\theta_{1\_2}$ ;  $\theta_{1\_3}$ ;  $\theta_{2\_1}$ ;  $\theta_{2\_2}$ ;  $\theta_{2\_3}$ ) välisseinatarindis salvestati andemte mõõtmiseks ja kogumiseks mõeldud täpismõõteseadmega „ALMEMO® 2890-9“. Antud andmelogeril on 9 ALMEMO® sisendpesa ning 2 väljundpesa. „ALMEMO® 2890-9“ andmeloger on võimeline salvestama sisemällu kuni 100 000 mõõdetud väärtust ning teostama 1 sekundi jooksul kuni 50 erinevat mõõtmistulemust. Mõõdetud ja salvestatud tulemusi saab spetsiaalse liidese abil transportida arvutisse. (www.ahlborn.com)



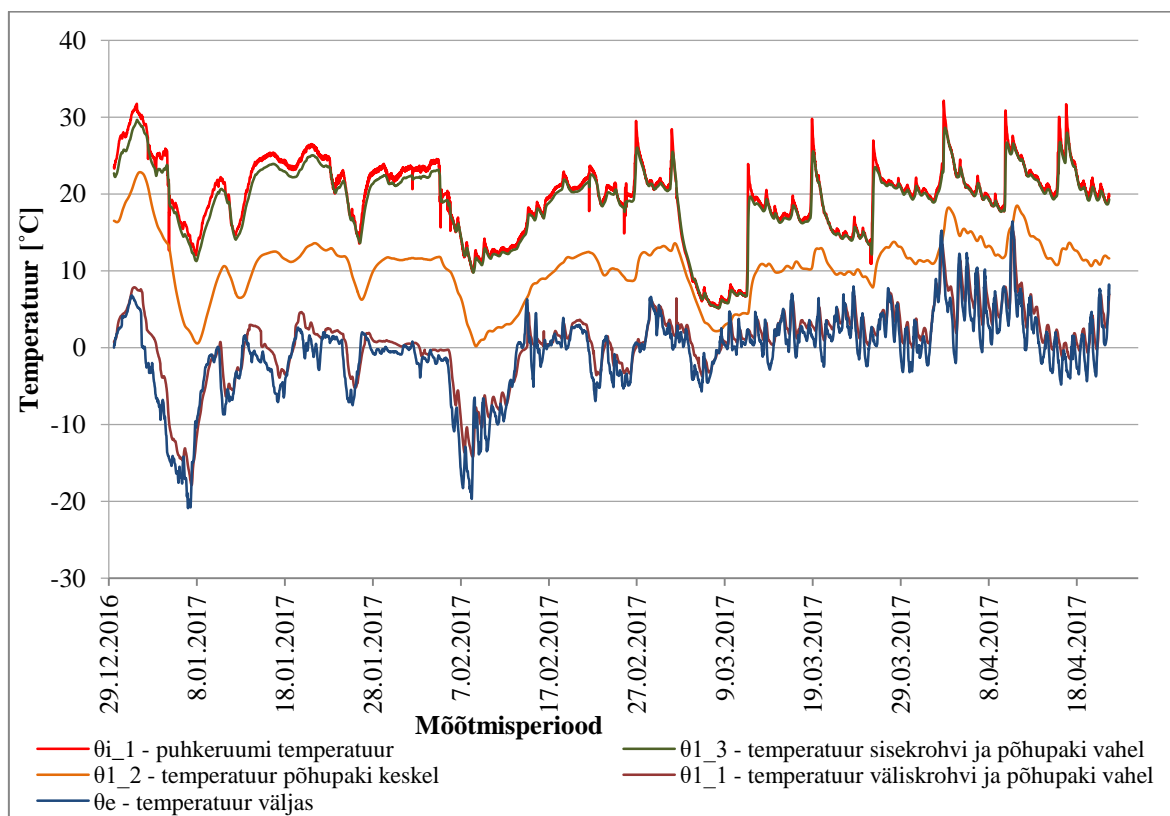
**Joonis 43.** Saunahoone välisseinatarindi andmete salvastamine „ALMEMO® 2890-9“ andmesalvestajaga



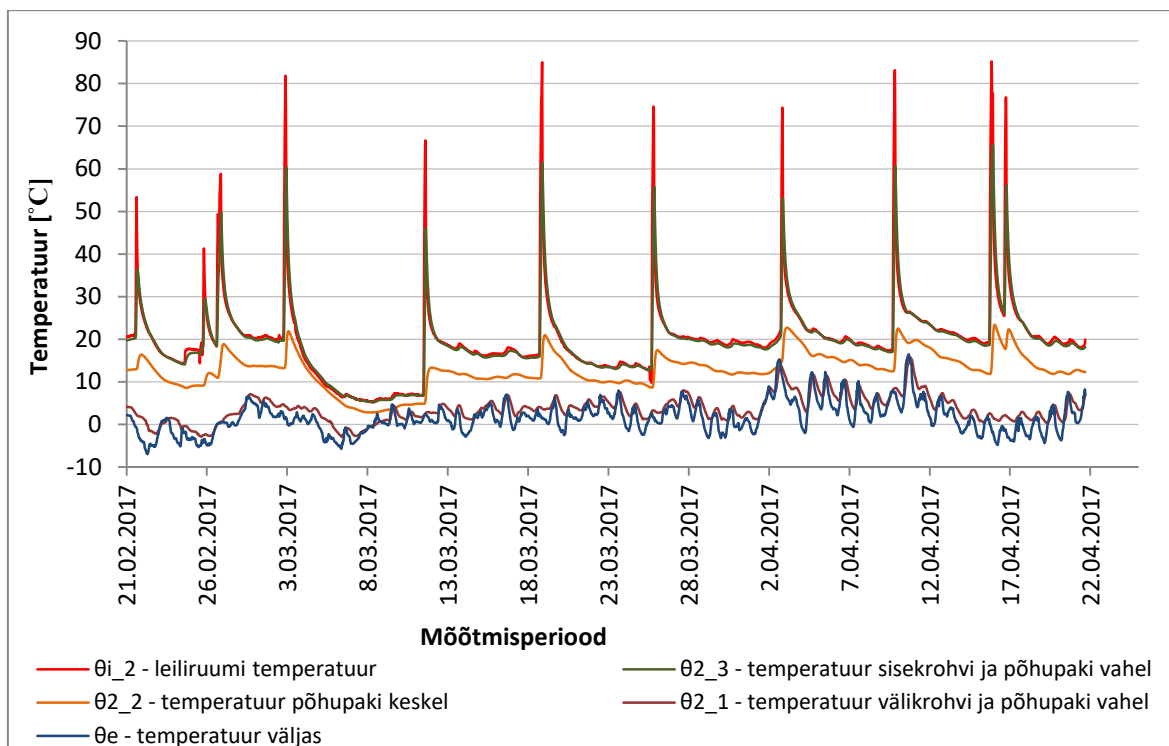
### 5.3 Saunahoone välisseina soojus- ja niiskustehniliste parameetrite mõõtmistulemused ja analüüs

Mõõtmisperioodil 29.12.2016 kuni 21.04.2017 jäi välistemperatuur  $-20,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  (07.01.2017 kell 00.00) ja  $16,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (10.04.2017 kell 17.00) vahele ning suhteline õhuniiskus 31,8 % ja 100% vahele. Keskmine sisetemperatuur oli  $19,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ning puhke- ja leiliruumi keskmine suhteline õhuniiskus oli ~33 %. Mõõteseadmed registreerisid mõõdetavaid ehitusfüüsikalisi parameetreid sünkroonselt 30 minutilise intervalliga, mis tagas mõõdetud tulemuste võrreldavuse.

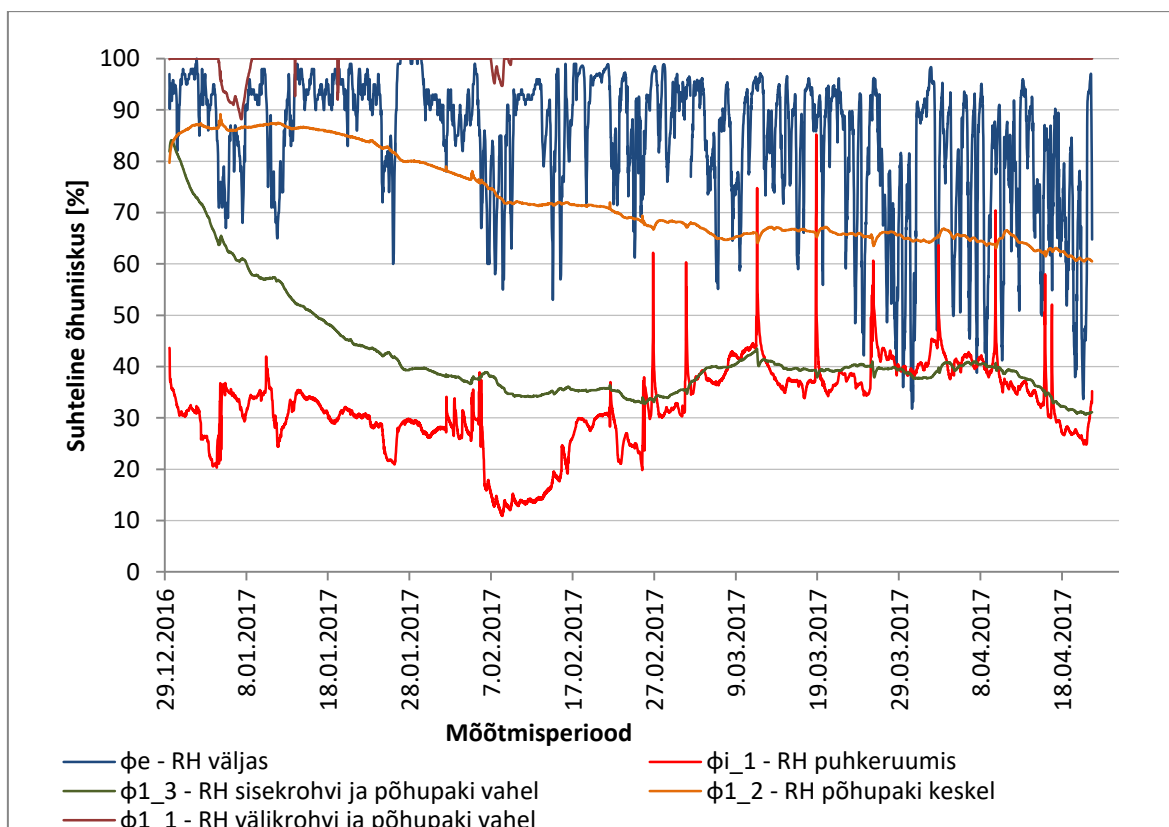
Mõõdetud välistemperatuurid ( $\theta_e$ ), puhke- ja leiliruumi sisetemperatuurid ( $\theta_{i_1}$ ;  $\theta_{i_{1u}}$ ;  $\theta_{i_2}$ ) ning temperatuurid puitkarkassist põhupakkidest soojustusega saunahoone välisseinatarindis ( $\theta_{1_1}$ ;  $\theta_{1_2}$ ;  $\theta_{1_3}$ ;  $\theta_{2_1}$ ;  $\theta_{2_2}$ ;  $\theta_{2_3}$ ) on esitatud joonistel 44 ja 45. Mõõdetud välisõhu suhteline niiskus ( $\varphi_e$ ), õhu suhtelised niiskused puhke- ja leiliruumis ( $\varphi_{i_1}$ ;  $\varphi_{i_{1u}}$ ;  $\varphi_{i_2}$ ) ning õhu suhtelised niiskused piirdetarindis ( $\varphi_{1_1}$ ;  $\varphi_{1_2}$ ;  $\varphi_{1_3}$ ;  $\varphi_{2_1}$ ;  $\varphi_{2_2}$ ;  $\varphi_{2_3}$ ) on esitatud joonistel 46 ja 47.



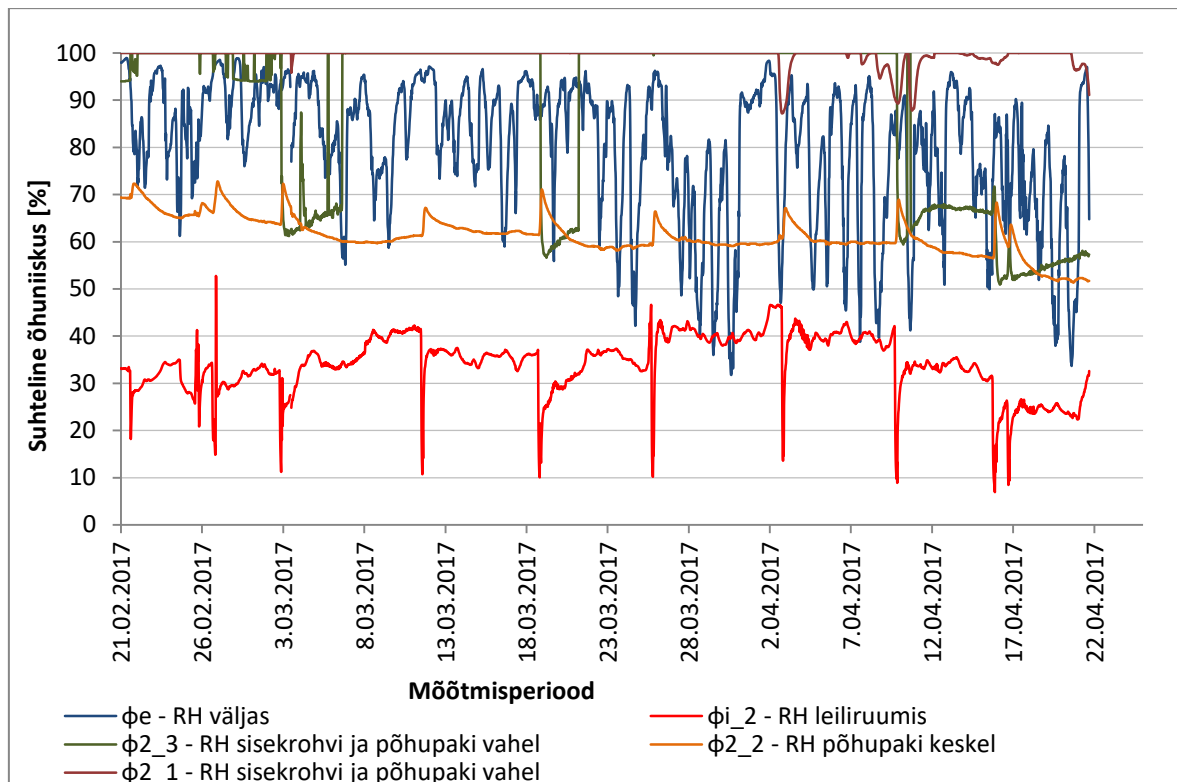
**Joonis 44.** Puhkeruumi (mõõtmiskoht 1) temperatuurid mõõtmisperioodil 29.12.2017-21.04.2017



**Joonis 45.** Leiliruumi (mõõtmiskoht 2) temperatuurid mõõtmisperioodil 21.02.2017-21.04.2017



**Joonis 46.** Puhkeruumi (mõõtmiskoht 1) suhtelised õhuniiskused mõõtmisperioodil 29.12.2017-21.04.2017



**Joonis 47.** Leiliruumi (mõõtmiskoht 2) suhtelised õhuniiskused mõõtmisperioodil 21.02.2017-21.04.2017

Puhkeruumi ja leiliruumi sisetemperatuurid kütmisvälisel ajal olid mõlemas ruumis praktiliselt võrdsed (joonis 44 ja 45), sest ruume eraldav vaheuks oli sellel ajal avatud ning ruume köeti ühe ja sama õliradiaatoriga. Temperatuuri graafikult (joonis 45) on näha, et kütmisel tõusis leiliruumi sisetemperatuur ( $\theta_{i_1}$ ) ja temperatuur savikroovi ja põhupakkide vahel ( $\theta_{i_3}$ ) keskmiselt  $\sim 80^\circ\text{C}$ . Samal ajal tõusis märgatavalt ka puhkeruumis lae all ( $h = 2,3\text{ m}$ ) olev sisetemperatuur ( $\theta_{i_{1u}}$ )  $\sim 40^\circ\text{C}$ , kusjuures puhkeruumi sisetemperatuur ( $\theta_{i_1}$ ) mõõtmiskõrgusel ( $h = 1,55\text{ m}$ ) oli leiliruumi kütmise ajal keskmiselt  $10^\circ\text{C}$  madalam kui lae all. Ühtlasi on jooniselt 45 näha, et temperatuur põhupaki keskel püsis küllaltki stabiilsena kogu mõõtmisperioodi jooksul tõustes  $\sim 10^\circ\text{C}$  leiliruumi temperatuuri tõstmisel  $\sim 60^\circ\text{C}$ . 15.04.2017 mõõdeti leiliruumi maksimaalseks temperatuuriks  $\theta_{i_2} = 85,186^\circ\text{C}$  ning temperatuur põhupaki keskel ei ületanud samal ajal  $23,40^\circ\text{C}$  väärtust.

Temperatuuri tõustes suureneb õhu veeaurusisaldus ning väheneb suhteline õhuniiskus. Seda väljendvad joonised 45 ja 47, kus leiliruumi temperatuuri tõustes väheneb suhtelise õhuniiskuse väärtus. Sama seost kirjeldab ka joonisel 44 ja 45 asuvate graafikute omavahelisel võrdlemine, kus kütmise ajal puhkeruumi temperatuur on oluliselt madalam

kui leiliruumis ning sellega seoses puhkeruumi suhteline õhuniiskus suureneb nii mõõtmiskõrgusel ( $\varphi_{i-1}$ ) kui ka puhkeruumi lae all ( $\varphi_{i-1u}$ ) (joonis 46).

Joonistel 46 ja 47 esitatud mõõdetud põhupakkide ja välisviimistluseks kasutatud lubikrohvi vahelise tsooni õhu suhtelise niiskuse väärtused mõõtmisperioodil on ~100% juures, mis võib viidata veeauru kondenseerumisele antud piirkonnas. Seda kinnitasid ka eelnevalt standardi EVS-EN ISO 13788:2012 alusel tehtud arvutused. Seetõttu on niiskusrežiimi seisukohalt tegemist kriitilise piirkonnaga saunahoone piirdetarindis.

Soojusvooplaadiga „FQA A018 CSI“ mõõtmisperioodil 29.12.2016-21.04.2017 mõõdetud tulemuste põhjal ning vastavalt ALMEMO® 2890-9 juhendile, arvutati Leigo talu saunahoone välisseina soojusläbivus valemiga 5.1. ([www.ahlborn.com](http://www.ahlborn.com)):

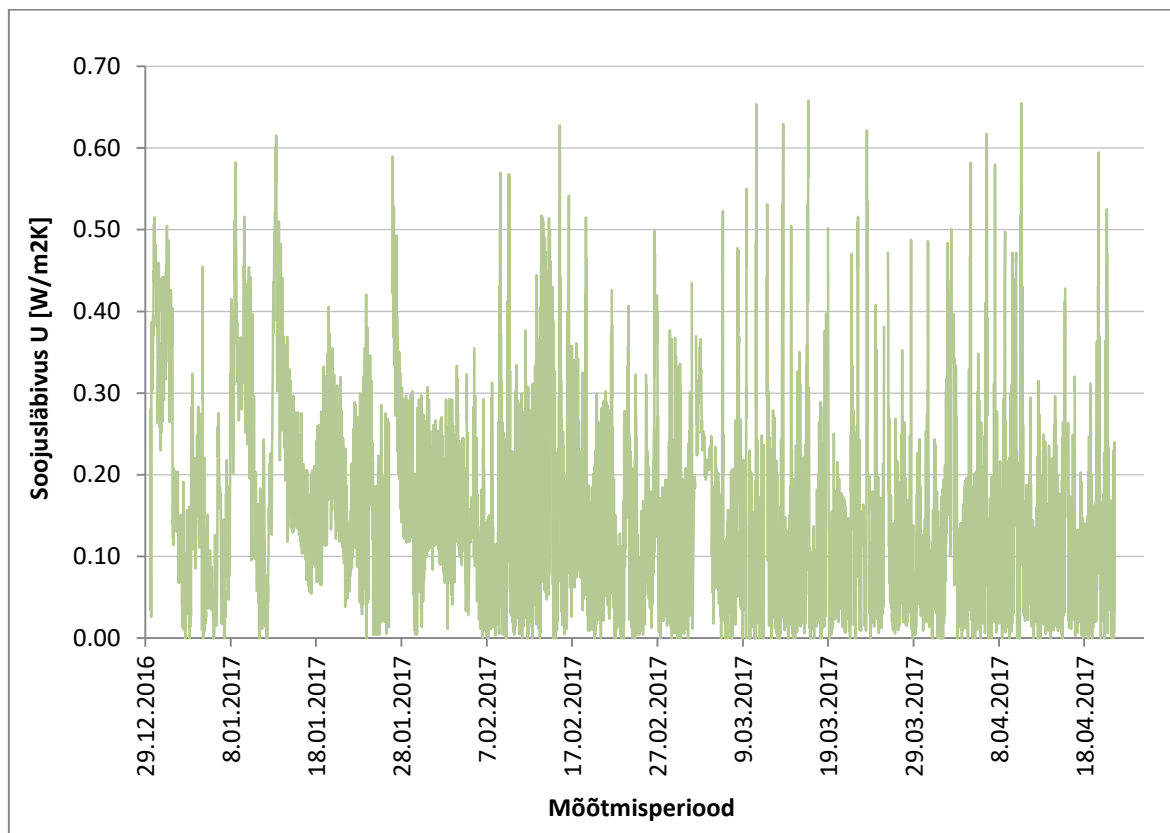
$$U = \frac{q}{\theta_i - \theta_e}, \quad (5.1.)$$

kus  $U$  – piirde soojusläbivus  $W/m^2K$ ;  
 $q$  – soojusvoog läbi piirde  $W/m^2$ ;  
 $\theta_{si}$  – puhkeruumi sisetemperatuur  $^{\circ}C$ ;  
 $\theta_{se}$  – välistemperatuur  $^{\circ}C$ .

Mittestatsionaarsetes tingimustes katseliselt mõõdetud parameetrite ( $q$ ;  $\theta_i$ ;  $\theta_e$ ) alusel ning valemiga 5.1. arvutatud Leigo talu puitkarkassist põhupakkidest soojustusega 580 mm paksuse välisseina soojusläbivuse keskmiseks väärtuseks puhkeruumis saime  $0,15 W/m^2K$ , mis on kooskõlas hetkel kehtiva Majandus- ja taristusministri määrusega nr. 55 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ RT I, 05.06.2015,15.

Katseliselt saadud saunahoone välisseina soojusläbivuse väärtus ( $U=0,15 W/m^2K$ ) on väiksem kui statsionaarsetes tingimustes arvtutatud piirdetarindi korrigeeritud soojusläbivuse väärtus ( $U_c=0,16 W/m^2K$ ). Põhjuseks võib olla arvutuste teostamiseks tabeli 3 alusel valitud kõige suurem põhupakkide soojuserijuhtivuse arvutuslik väärtus ( $\lambda=0,08 W/mK$ ). Samas mõjutab katseliselt mõõdetud soojusläbivuse tulemusi ka ehitustööde käigus piirdetarindisse sattunud niiskus (sise- ja välisviimistlusel savi- ja lubikrohviga seinte krohvimisel), mis vähendab oluliselt põhupakkide soojustakistust. Seega peaks saunahoone piirdetarindis paiknevate põhupakkide soojuserijuhtivus olema

kindlasti väiksem kui 0,08 W/mK. Joonisel 48 on esitatud välisseina soojuslähivuse väärtused mõõtmisperioodil.



**Joonis 48.** Puhkeruumi (mõõtmiskoht 1) välisseina soojuslähivus mõõtmisperioodil 29.12.0261-21.04.2017

Jooniselt 48 võib näha, et mõõtmisperioodil on soojuslähivuse põhifoon suhteliselt ühtlane ning kõrvalekaldena esineb üksikuid teravaid tippe graafikul, mis mõjutavad piirdetarindi keskmist soojuslähivust. Kõrvalekalded võivad olla seotud antud kuupäevadel teostatud ehitustöödega või leiliruumi kütmisega saunahoones. Samas võivad soojuslähivuse üksikud kõrvalekalded põhifoonist olla veel põhjustatud päevasel ajal päikesevalguse peale langemisest soojusvooplaadile.

Mittehomogeensetest kihtidest koosnev põhupakkidest soojustusega katsehoone välisseina niiskustehniline analüüs mõõdetud parameetrite alusel, teostati järgmistel perioodidel: 01.01.2017...31.01.2017; 01.02.2017...28.02.2017; 01.03.2017...31.03.2017 ja 01.04.2017...21.04.2017. Vaadeldavate perioodide mõõtmistulemused on koondatud tabelitesse, mis on esitatud lisas 7 ja lisas 8.

Veeauru hulka õhus võib väljendada nii veeauru suhtelise niiskusega (RH), mis iseloomustab tegeliku veeauru osarõhu protsentuaalset suhet küllastunud veeauru osarõhku, kui ka õhu veeaurusisaldusega, mis iseloomustab veeauru massi suhet kuiva õhu mahtu. Mõõtmisperioodil mõõdetud tulemuste põhjal arvutati õhu veeaurusisaldus Clapeyroni-Mendelejevi võrrandist ehk ideaalse gaasi olekuvõrrandist valemiga 5.2.:

$$pV = \frac{m}{M} RT \Rightarrow \frac{m}{V} = \frac{Mp}{RT} \Rightarrow \frac{m}{V} = \nu \Rightarrow \nu = \frac{Mp}{RT} = \frac{Mp}{R(273,15 + \theta)}, \quad (5.2.)$$

kus  $\nu$  – õhu veeaurusisaldus kg/m<sup>3</sup>;

$M$  – gaasi (veeauru) molaarmass kg/kmol (veeaurul  $M=18,015$  kg/kmol);

$p$  – gaasi rõhk (veeauru osarõhk) Pa;

$R$  – universaalne gaasikonstant J/kmolK (SI-süsteemis  $R=8,31441 \cdot 10^3$  J/kmolK);

$T$  – gaasi (õhu) absoluutne temperatuur K ( $T=273,15+\theta$ );

$\theta$  – gaasi (õhu) temperatuur °C;

$V$  – gaasi (õhu) ruumala m<sup>3</sup>;

$m$  – gaasi (veeauru) mass kg.

Veeauru osarõhk arvutati valemiga 5.3.:

$$p = \frac{\varphi \cdot 610,5 \cdot e^{\frac{17,269\theta}{237,3+\theta}}}{100}, \quad \text{kui } \theta \geq 0^\circ \text{C}, \quad (5.3.)$$

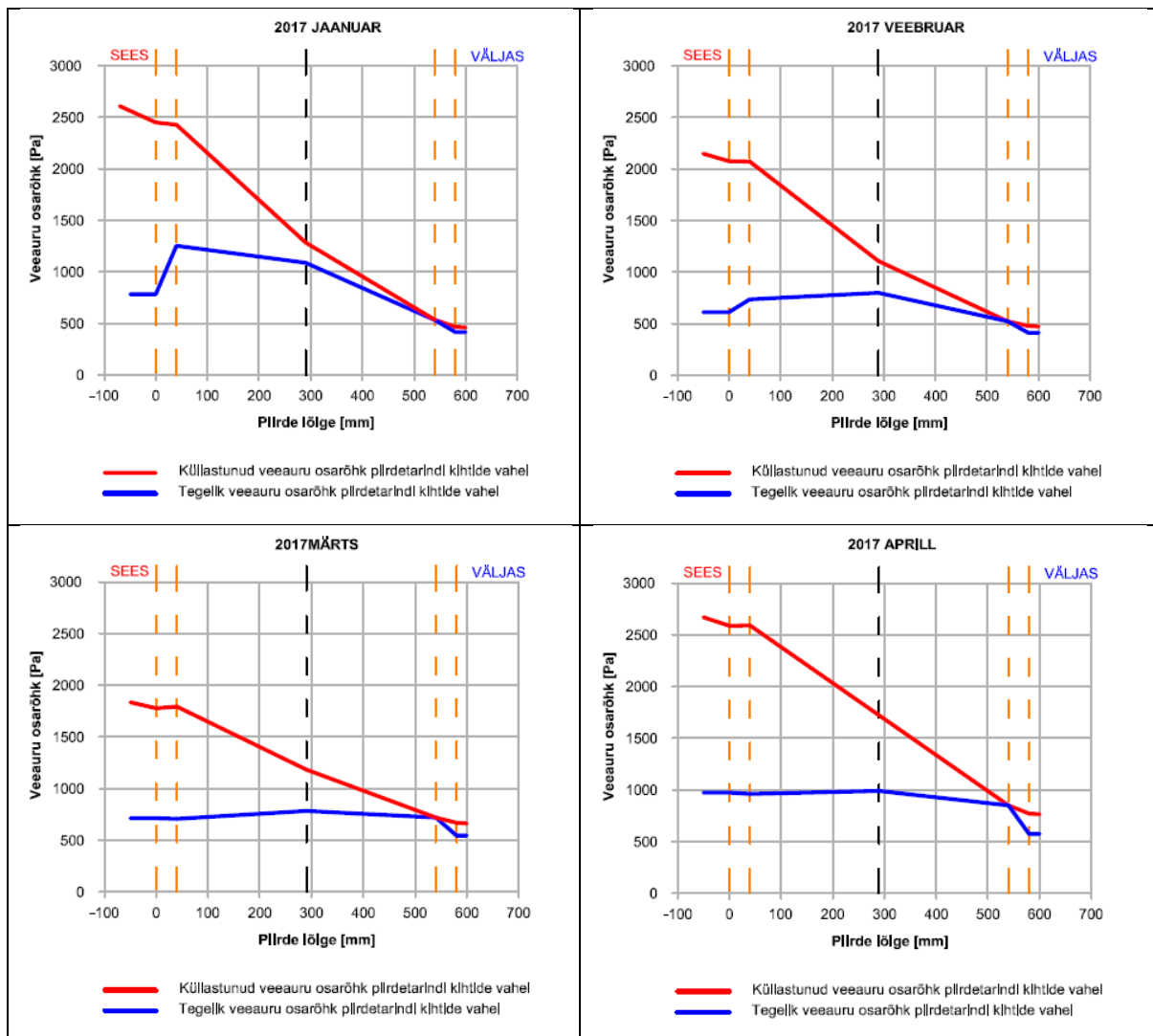
või valemiga 5.4.:

$$p = \frac{\varphi \cdot 610,5 \cdot e^{\frac{21,875\theta}{265,5+\theta}}}{100}, \quad \text{kui } \theta < 0^\circ \text{C}. \quad (5.4.)$$

Ajavahemikul 01.01.2017 kuni 21.04.2017 mõõdetud tulemuste põhjal õhu veeaurusisaldused on esitatud tabelites lisa 7 ja lisa 8.

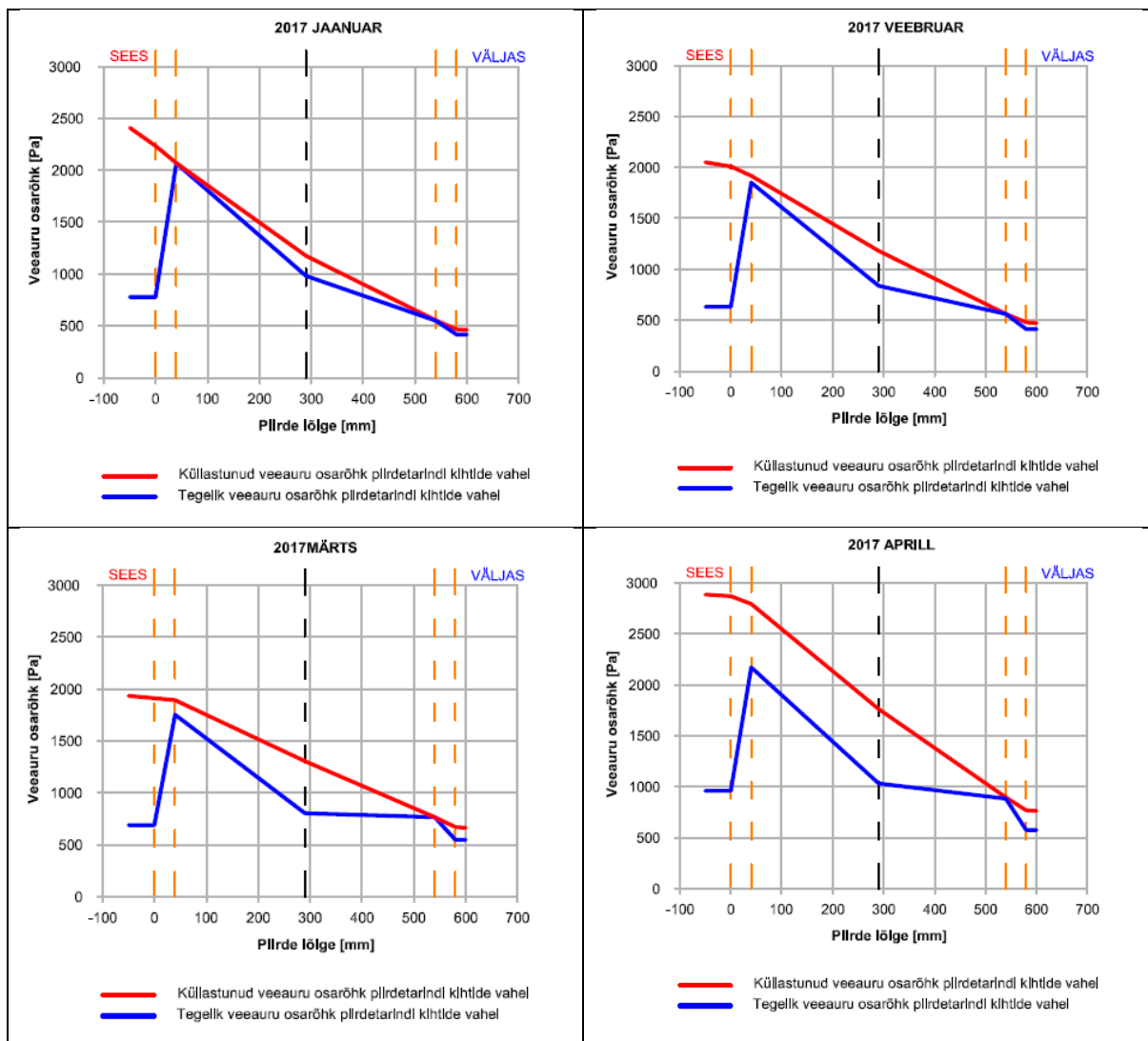
Mittestatsionaarsetes tingimustes puhkeruumis mõõdetud tulemuste põhjal (lisa 7), on näha, et jaanuaris ja veebruaris diffusiooni tõttu piirdetarindis õhuniiskuse kondenseerumist ei toimunud. Tähelepanu väärib ning kriitiliseks piirkonnaks on ikkagi põhupakkide ja välisviimistluskrohvi (lubikrohvi) vaheline tsoon, kus jaanuari kuu keskmine suhteline õhuniiskuse tase on 99,07 % ja veebruaris 99,80 %. Statsionaarsetes tingimustes teostatud arvutustulemuste (lisa 3) kohaselt tekib kondensaat eelpool

nimetatud kuudel just põhupakkide ja väliskroovi vahele. Arvutatud ja mõõdetud tulemuste mõningased erinevused tulenevad kindlasti keskkonna muutuvatest tingimustest, välis- ja sisetemperatuuri väärtustest ning siseruumide ventilatsioonist ja niiskustasest. Puhkeruumis mõõdetud tulemuste põhjal (lisa 7) võib märtsis ja aprillis täheldada diffusiooni tõttu veeauru kondenseerumist kriitilises piirkonnas - põhupakkide ja välisviimistluseks kasutatud lubikroovi piiripinnal, mis kinnitab standardi EVS-EN ISO 13788:2012 põhjal arvutatud tulemusi (lisa 3). Märtsi kuus on eelnimetatud kihtide vaheline mõõdetud keskmine temperatuur 2,28 °C ning veeauru osarõhk  $P=720$  Pa on võrdne küllastunud veeauru osarõhuga  $P_{\text{sat}}=720$  Pa. Aprilli kuus on põhupakkide ja väliskroovi vahelise piiripinna keskmine mõõdetud temperatuur 4,66 °C ning veeauru osarõhk  $P=851$  Pa on võrdne küllastunud veeauru osarõhuga  $P_{\text{sat}}=851$  Pa. Joonisel 49 on esitatud mõõtmistulemuste põhjal arvutatud puhkeruumi partsiaalrõhkude graafikuid.



**Joonis 49.** Puhkeruumis mõõdetud välisseina küllastunud ja tegelikud veeauru osarõhud

Leiliruumis niiskusrežiimi hindamiseks mõõdetud tulemuste põhjal (Lisa 8) võib järeldada, et õhuniiskuse kondenseerumist jaanuaris, veebruaris, märtsis ja aprillis ei toimu. Küll aga on pühupakkide ja välisviimistluseks kasutatud lubikrohvi piiripinnal (kriitilises piirkonnas) suhtline õhuniiskus küllalki lähedal 100%-le, olles jaanuaris 99,70 %, veebruaris 99,98 %, märtsis 99,99 % ning aprillis 98,52%. Kuna puhke- ja leiliruumi vaheline uks oli avatud sunaruumi kütmisvälistel aegadel ja ka pärast kütmist ning mõlemat ruumi ventileeriti läbi avatavate akende siis sisekliima tingimused mõlemas ruumis olid mõõtmisperioodil (v.a. leiliruumi kütmise ajal) praktiliselt võrdsed. Joonisel 50 on esitatud mõõtmistulemuste põhjal arvutatud leiliruumi partsiaalrõhkude graafikuid.

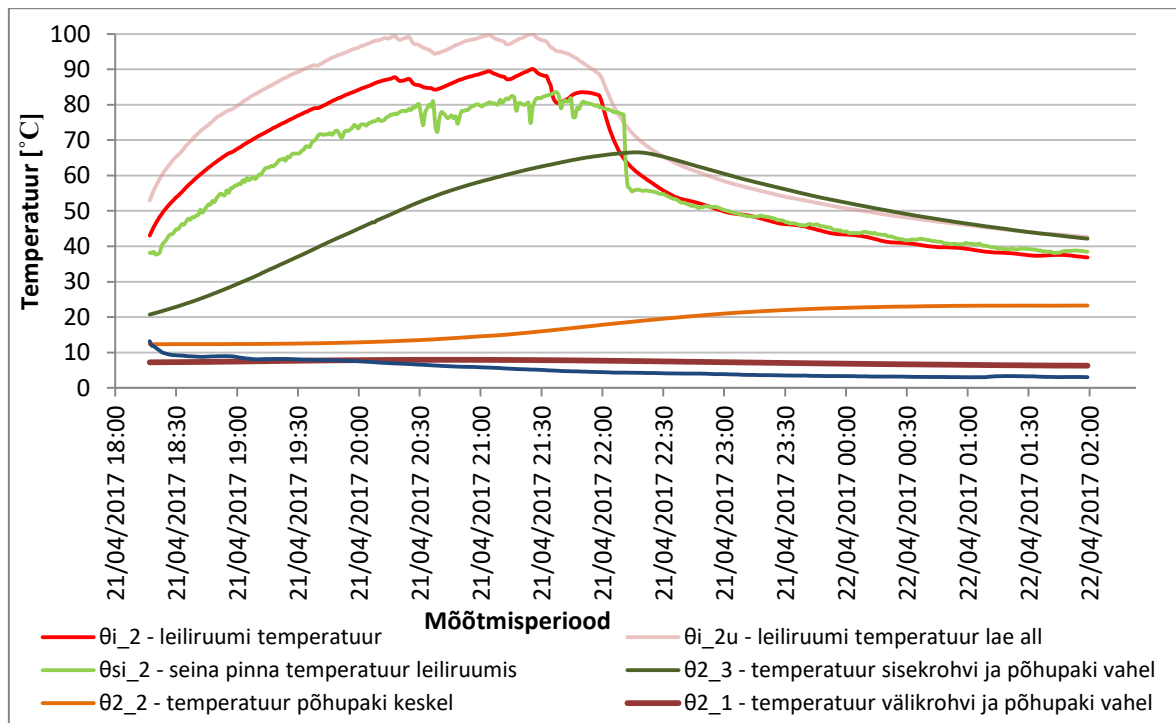


**Joonis 50.** Leiliruumis mõõtmisperioodil (01.01-21.04.17) mõõdetud välisseinatarindi küllastunud ja tegelikud veeauru osarõhud

Leiliruumi välisseina niiskusrežiimi täpsemaks hindamiseks teostati leiliruumi kütmine 21.04.2017, kus temperatuure ( $\theta_{i,2}$ ;  $\theta_{i,2u}$ ;  $\theta_{si,2}$ ;  $\theta_{2,3}$ ;  $\theta_{2,2}$ ;  $\theta_{2,1}$ ;  $\theta_{se,2}$ ;  $\theta_e$ ) ja suhtelist

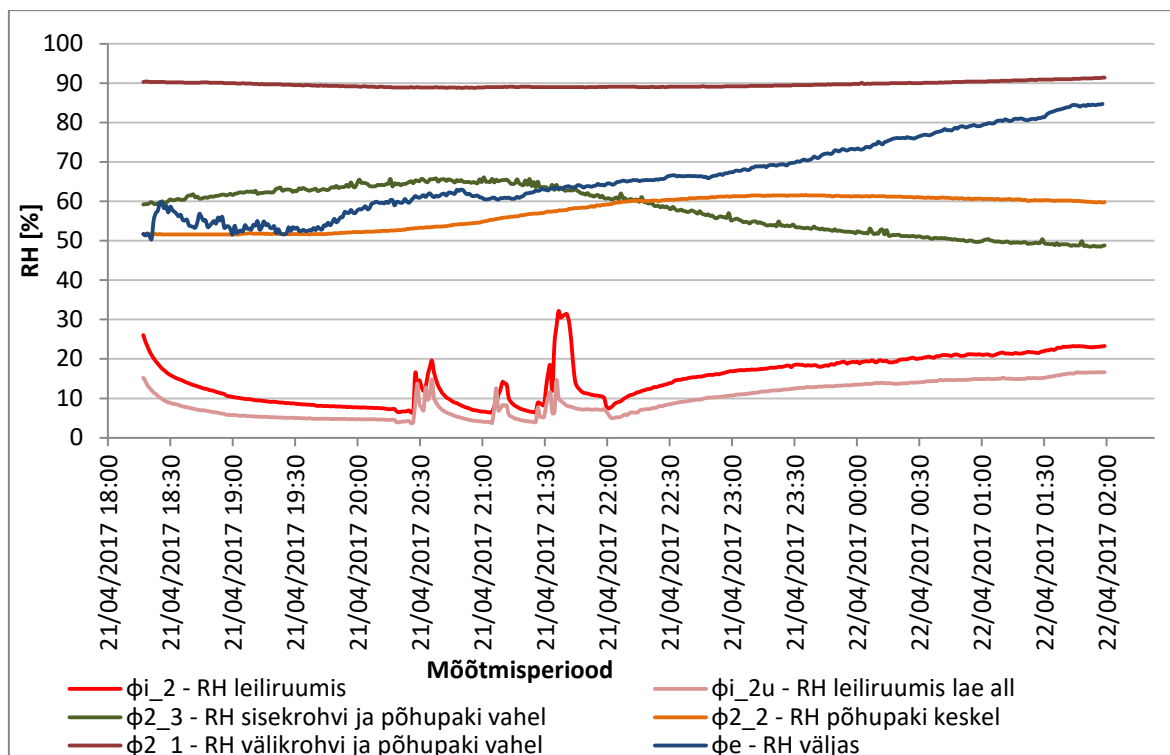


õhuniiskust ( $\varphi_{i\_2}$ ;  $\varphi_{i\_2u}$ ;  $\varphi_{2\_3}$ ;  $\varphi_{2\_2}$ ;  $\varphi_{2\_1}$ ;  $\varphi_e$ ) mõõdeti 1 min intervalliga perioodil 21.04.2017 kuni 23.04.2017. Leiliruumi köeti 4 tundi ning niiskuslisa ruumi oli leili viskamisega saunakerisele 2,5 liitrit. Leiliruumi mõõtmistulemused 1 min intervalliga on koondatud lisas 9 esitatud tabelisse. Joonistel 51, 52 ja 53 on graafiliselt esitatud sauna mõõtmistulemused ajavahemikul 21.04.2017 kella 18.17 kuni 22.04.2017 kella 02.00.

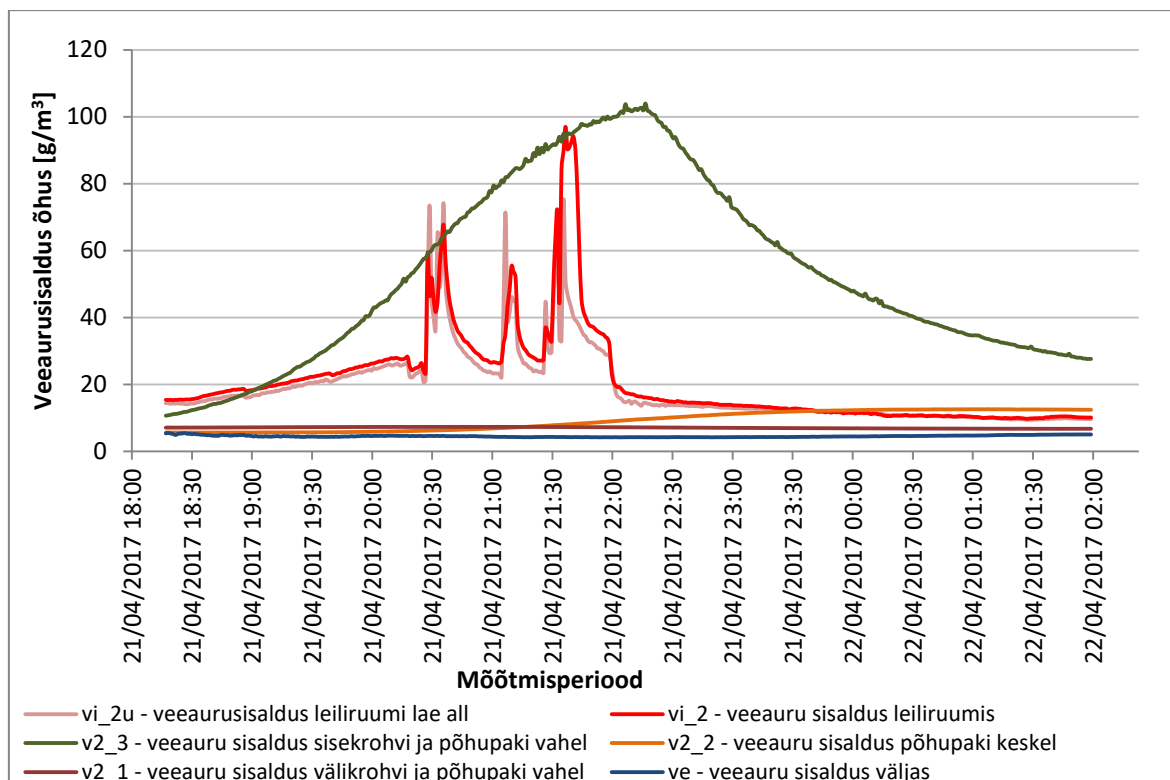


**Joonis 51.** Temperatuurid leiliruumis mõõtmisperioodil 21.04.2017 kell 18.17 kuni 22.04.2017 kell 02.00

Enne leiliruumi kütma asumist oli ruumi keskmine temperatuur andurite paiknemiskõrgusel ( $\theta_{i\_2}$ ) ~20 °C. Leiliruumi kütmisel tõusis ruumi lae alune ( $\theta_{i\_2u}$ ) maksimaalne temperatuur 99,99 °C (temperatuuri mõõdeti TMC6-HD temperatuurianduriga, mis mõõdab temperatuuri kuni 100 °C). Maksimaalne temperatuuri väärtus 1,55 m mõõtmiskõrgusel ( $\theta_{i\_2}$ ) mõõdeti 90,11 °C (joonis 51). Savikrohvi seina pinna kõrgeimaks temperatuuri väärtuseks mõõdeti 83,5 °C (joonis 51) ja temperatuur põhupaki ja savikrohvi vahel saavutas suurimaks väärtuseks 66,55 °C (joonis 51). Samas tõusis põhupaki keskelt mõõdetud temperatuuri väärtus ainult 23,25 °C-ni (joonis 51) ja põhupakkide ning väliskrohvi (lubikrohvi) vaheline temperatuur märgatavaid muutusi ei teinud.



**Joonis 52.** Leiliaruumis piirdetarindi suhteline õhuniiskus mõõtmisperioodil 21.04.2017 kell 18.17 kuni 22.04.2017 kell 02.00



**Joonis 53.** Õhu veeaurisisaldus leiliaruumis mõõtmisperioodil 21.04.2017 kell 18.17 kuni 22.04.2017 kell 02.00

Leiliaruumi kütmisele eelnenud õhu veeaurusisaldus leiliruumis ( $v_{i,2}$ ) oli  $5,59 \text{ g/m}^3$  ja suhteline õhuniiskus ( $\phi_{i,2}$ ) 32,6 %. Temperatuuri tõustes suhteline õhuniiskus piirdetarindis langes ning veeaurusisaldus leiliruumis ja põhupakkidega soojustatud piirdetarindis tõusis. Leili viskamise ajal tõusis õhu maksimaalne veeaurusisaldus leiliruumis  $97 \text{ g/m}^3$  ning savikrohvi ja põhupakkide vahelise tsooni õhu veeaurusisaldus tõusis  $104 \text{ g/m}^3$ . Vastavalt lisas 9 esitatud mõõtmistulemustele veeauru kondenseerumist diffusiooni teel puitkarkassist põhupakkidest soojustusega välisseinatarindis kütmisperioodil ei toimunud.

Leigo talu puitkarkassist põhupakkidega soojustatud välisseintega saunahoone ehitustööde kvaliteeti kontrolliti ka infrapunakaameraga, mille abil on võimalik tuvastada katsehoone piirdetarindi külmasildu, õhulekkeid ja põhupakkide paigalduse kvaliteeti. Saunahoone pinnatemperatuure mõõdeti termokaameraga 25.02.2017. Mõõtmise ajal oli õhu temperatuur väljas  $-4,23 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ja temperatuur hoones sees  $18,03 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Termograafilisi mõõtmisi teostati „Flir E4“ termokaameraga, mis mõõdab pinnalt peegeldunud või kiirgunud soojusenergiat ning arvutab pinna temperatuuri. Joonisel 54 on mõõdetud tulemused.

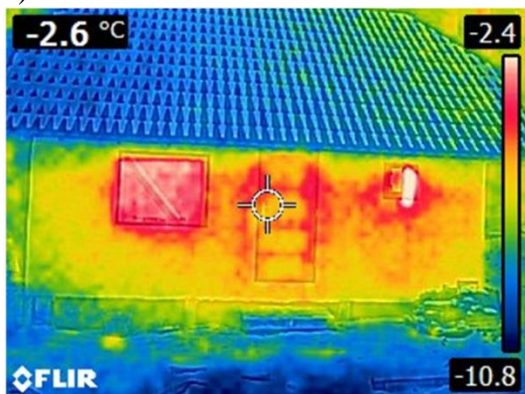
a)



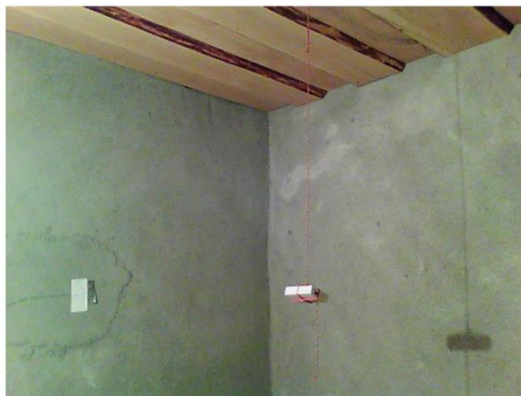
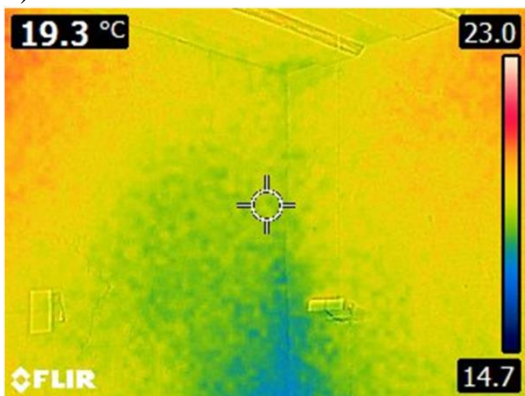
b)



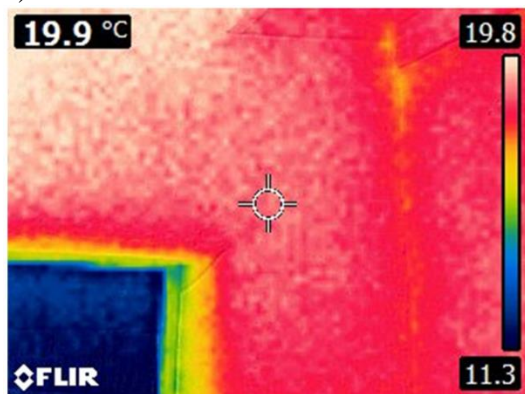
c)



d)



e)



**Joonis 54.** Termokaameraga mõõdetud pinnatemperatuurid saunahoones 25.02.2017: a) leiliruumi otsasein; b) sissepääs; c) fassaad; d) leiliruumi nurk; e) puhkeruumi nurk.

Joonisel 54 paiknevatelt termopiltidelt on näha, et suurimad pinnatemperatuuride erinevused esinevad avade ümbruses (uksed ja aknad), kus avatäidete enda soojuslähivus on oluliselt suurem kui 580 mm paksusel põhupakkidest soojustusega piirdetarindil (joonis 54 b, c ja e). Ühtlasi võib märgata pinnatemperatuuride erinevusi ka hoone sisenurkades (joonis 54 d) ning põhupakkidest soojustusega seina konstruktsiooni üleminekul mineraalvillaga soojustatud välispiirdele (joonis 54 a).



## Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärgiks oli tutvustada ja analüüsida põhupakkidest hoone ehitusprotsessi ning -tehnoloogiat. Antud uurimustöö käigus anti ülevaade põhu ning sellest ehitatud välisseinte viimistlemiseks kasutatava lubi- ja savikrohvi omadustest ning põhupakkide ehitusfüüsikalistest parameetritest.

Katsehoone ehitusega Leigo tallu alustati 08.08.2016. Põhupakid varuti viljakoristamise järgselt 20.08 - 21.08.2016 ning paigaldusega seina alustati 11.09.2016. Välisseinte ehitustööd lõpetati 22.09.2016. Lubikrohviga välisviimistlust teostati ajavahemikul 01.10 - 16.10.2016. Saunahoonet hakati kütma alates 30.11.2016. Siseviimistlus lubi- ja savikrohviga viidi läbi vahemikul 03.12 - 19.12.2016. Ehitusfüüsikalisi parameetrid katsehoones hakati mõõtma 29.12.2016 ning lõpetati antud uurimustöö raames 24.04.2017.

Katsehoone ehitamisprotsessi käigus antud uurimustöö raames omandasid autorid rohkelt väärtuslikke teoreetilisi ning praktilisi teadmisi põhupakkidest hoonete ehitamisel ja planeerimisel. Sellega seoses võib põhupakkidest hoonete ehitamist Eestis propageerida, arvestades, et põhupakkidest soojustusega hooned sobivad hästi energiasäästlike üksikelaanute planeerimiseks. Viimase puhul on see oluline teadmine oma jõuduega iseseisvalt ehitamiseks, sest suhteliselt suure kuluartikli moodustab tööjõu maksumus. Kui tööstuslikult toodetud materjalidega hoonete ehitamisel on sõltuvalt etappidest keskmine materjalikulu  $\sim 2/3$  ehk 60-70 % ja tööjõukulu  $\sim 1/3$  ehk 30-40 % kogukulust, siis põhupakkidest piirdetarinditega hoonete ehitamisel on vastavad numbrid  $\sim 53$  % ning  $\sim 47$  % kogukulust. Ehitustehniliste eripärade arvestamisel tuleb kindlasti enne tööde alustamist tutvuda erialase tõendus põhise kirjandusega ning konsulteerida antud hoonete ehituskogemuse saanud spetsialisti(de)ga.

Mittehomogeensete välisseintega Leigo talu saunahoone ehitustöödele eelneva planeerimise ja projekteerimise faasi käigus teostati soojus- ja niiskustehnilise toimivuse arvutuslik kontroll statsionaarsetes tingimustes. Arvutatud 580 mm põhupakkidest soojustusega korrigeeritud soojusläbivuse väärtuseks saadi  $U_c=0,16$  (W/m<sup>2</sup>K). Välispiirde niiskusrežiimi arvutamisel koostatud osarõhkude graafikutelt võis järeldada difusiooni tõttu tekkinud kondensaadi teket põhupakkide ja välisviimistluseks kasutatud lubikrohvi vahel, kus tegelik veeauru osarõhk sai võrdseks küllastunud veeauru osarõhuga. Seetõttu

teostati ka hallituse tekke kontroll ning ühtlasi kontrolliti ka aasta lõikes kondenseerunud ja aurustunud vee hulka selles tsoonis. Arvutustulemuste põhjal on aasta lõikes põhupakkide ja välisviimistluskrohvi (lubikrohvi) tsoonis aurustunud vee hulk oluliselt suurem kui kondenseerunud vee hulk, seega jõuab talveperioodil tekkida võiv kondensaat suvel välja kuivada. Arvutuslikult on hallituse tekke seisukohalt soodsate temperatuuride (üle 10°C) ja piisava suhtelise õhuniiskuse ( $RH > 80\%$ ) olemasolul kriitiliseks piirkonnaks taaskord põhupakkide ja välisviimistluskrohvi vaheline ala suveperioodil juunist oktoobrini, mis vajab lisaks täpsemat uurimist.

Puhkeruumis oli mõõtmisperioodil keskmine sisetemperatuur 19,6°C ja suhteline õhuniiskus 32,8 %. Välitemperatuur langes kõige külmemal päeval -20,9°C. Leiliruumi köeti kord nädalas, et jäljendada keskmise üksikelamu sauna kasutamise tihedust. Leiliruumis tõusis sisetemperatuur mõõtmiskohas keskmiselt üle 80°C ning lae all üle 100°C. Kõikidel kütiskordadel oli leiliruumi niiskulisa kerisele leili viskamisega 2,5 liitrit.

Katseliselt mõõdetud tulemuste põhjal arvutatud puitkarkassist põhupakkidega soojustatud välisseina soojusläbivuse väärtuseks saadi  $U=0,15$  (W/m<sup>2</sup>K), mis on madalam kui eelnevalt arvutatud tulemus. Mõlemad tulemused sobivad esmase lähendusena elamute ja mitteelamute soojusläbivuse väärtuseks, kui võtta aluseks hetkel kehtiv Majandus- ja taristusministri määrus nr. 55 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“. Mõõtmisperioodil saadud tulemuste põhjal arvutatud soojusläbivuse väärtus on suure tõenäosusega mõjutatud ehitusniiskusest, mis ei ole jõudnud veel täielikult seintest välja kuivada. Lisaks on näidud mõjutatud mõõtmisperioodil teostatud ehitustegevustest ning leiliruumi kütmisest kõrvalruumis. Sellega arvestades peaks Leigo talu väikepõhupakkidest saunahoone välisseinte soojusläbivus pärast suveperioodi mõõdetuna uuel kütteperioodil madalam olema.

Mõõtmisperioodil saadud tulemuste põhjal koostatud osarõhkude graafikutelt võis täheldada difusiooni tõttu veeauru kondenseerumist puhkeruumis 2017. aasta märtsis-aprillis ning osarõhkude erinevuse tõttu leiliruumi välisseinatarindis kondenseerumist ei toimunud. Kriitiline piirkond oli põhupakkide ja välisviimistluskrohvi (lubikrohvi)

vaheline ala, kus mõõtmisperioodil 01.01-21.04.2017 oli õhu suhteline niiskus stabiilselt üle 99 %, mis kinnitab statsionaarsetes tingimustes arvutatud tulemusi.

Leiliruumi välisseina detailsel uurimisel 21.04.2017 mõõdetud tulemuste põhjal on näha, et leiliruumi temperatuuri tõustes 90,11°C-ni, tõusis temperatuuri põhupakkide ja siseviimistluskrohvi (savikrohvi) vahel 66,55°C-ni ning põhupakkide keskel kõigest 23,25°C-ni. Visuaalsel hindamisel leiliruumi viimistluseks kasutatud lubikrohvis mehhaanilisi kahjustusi märgata ei ole. Savikrohvis on märgata mõningaid üksikuid kahjustusi lava ja seinte ühenduskohtades veepritsmetega kokkupuutest.

Lõputöö tulemusena võib järeldada, et väikepõhupakkidest piirdetarindite ehitamine on Eesti kliimatingimustes sobiv. Välisseinatarindites võib kasutada Eestis enamlevinud 500 mm laiusega põhupakke ning tuleohutuse ja ilmastiku kaitseks viimistlusmaterjalidena lubi- ja savikrohvi. Niiskusrežiimi seisukohast vajab kõrgendatud tähelepanu põhupakkide ja välisviimistluskrohvi vaheline tsoon. Uurimustöö autorid soovivad põhupakkidest seintega hoonete välisviimistluseks kasutada lubikrohvi, mis on ilmastikuoludele (päike, tuul, vihm, lumi jne) vastupidavam kui savikrohv. Siseviimistlusel võib kasutada nii lubi- kui ka savikrohvi vastavalt soovitavale tulemusele. Leiliruumi kõrgetel temperatuuridel peaks savikrohv olema vastupidavam kui lubikrohv, kuid esimese puuduseks on vähene vastupidavus otsese veekontaktiga. Lõputöös ei uuritud leiliruumi viimistlemist tadelaktiga, mis peaks olema sobivaim kohtades, kus on tegemist kõrgete temperatuuride ja otsese veega.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Akermann, K., Vahejõe, K.** (2011). Savi valdkonna käsiraamat. Tartu: Eesti Maaülikool. 38 lk.
2. **Allikas, K.** (2015). Eestis ehitatud põhust elumajade ehituslikud lahendused ja omadused. Magistritöö. Eesti Maaülikool. Tartu. 63 lk.
3. Amazon Nails. (2001). Information guide to straw bale building. 76 lk.
4. **\*Berge, B., Henley, F.** (2009). The ecology of building materials. Boston: Architectural Press. 435 lk, viidatud: Miljan, J. (2012). Ehitusmaterjalid ja nende tootmiseks kuluv energia - Kohalikud looduslikud ehitusmaterjalid ja nende kasutamine, Tartu: Salibar OÜ, lk 6-7 vahendusel.
5. **Carfrae, J.** (2011). The Moisture Performance of straw bale construction in a temperate maritime climate. Plymouth: University of Plymouth. 276 lk.
6. **Corum, N., & Goodall, J.** (2005). Building a Straw Bale House: The Red Feather Construction Handbook. New York: Princeton Architectural Press, New York. 181 lk.
7. **Costes, J.-P., Evrard, A., Biot, B., Keutgen, G., Daras, A., Dubois, S., et al.** (2017). Thermal Conductivity of Straw Bales: Full Size. MDPI AG. 15 lk.
8. **EET-2 0404-0764, 2.** (2009). Välisseina difusiooni arvutus. Eesti Ehitusteave.
9. **EET-20102-0329, 2.** (2000). Eesti kliima teatmik ehitajale. Eesti Ehitusteave.
10. **EVS-EN 1995-1-1:2007.** (2007). Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. EVS-EN 1995-1-1:2007. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
11. **EVS-EN 1997-1:2006.** (2006). Eurokoodeks 7: Geotehniline projekteerimine. Osa 1: Üldeeskirjad.
12. **EVS-EN 338:2009.** (2012). Ehituspuit. Tugevusklassid. EVS-EN 338:2009. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
13. **EVS-EN ISO 13788:2012.** (2012). Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus. Kriitilise pinnaniiskuse ja elemendisise kondenseerumise vältimine. Arvutusmeetodid.
14. **EVS-EN ISO 6946:2008.** (2008). Hoonete komponendid ja hoonekonstruktsioonid. Soojustakistus ja soojusjuhtivus. Arvutusmeetod. EVS-EN ISO 6946:2008. Tallinn: Eesti Standardikeskus.



15. Feuillette, C. (2017). Allikas: <https://sites.google.com/a/compaillons.eu/feuillette-house/Le-projet-Feuillette-house>
16. **Grätz, M., & Indriksone, D.** (2011). Ökoloogilised ehitusmaterjalid. Tallinn: AS Rebellis. 29 lk.
17. **Hammond, G, Jones C.** (2008). Inventory of carbon & energy (ICE), Version 1.6a. Bath: University of Bath. Miljan, J. (2012). Ehitusmaterjalid ja nende tootmiseks kuluv energia - Kohalikud looduslikud ehitusmaterjalid ja nende kasutamine, Tartu: Salibar OÜ, lk 7 vahendusel.
18. **Hodge, B. (2006).** Building your straw bale home: from foundations to the roof. Australia: Csiro Publishing. 260 lk.
19. **Hukka, A., & Viitanen, H.** (1999). A mathematical model of mold grow on wooden materials. Wood Science and Technology . 33: 475-485.
20. **Jõgeda, T. (2011).** Moodne maja: Savist ja põhust kindlus. Eesti Ekspress, <http://ekspress.delfi.ee/kuum/moodne-maja-savist-ja-pohust-kindlus?id=63317514>.
21. **Kalamees, T.** Ehitusfüüsika II. Retrieved from [https://www.ttu.ee/public/p/projektid/BuildEst/Ehitusfuusika\\_II\\_Osa\\_T\\_Kalamees.pdf](https://www.ttu.ee/public/p/projektid/BuildEst/Ehitusfuusika_II_Osa_T_Kalamees.pdf)
22. **Keppo, J.** (2004). Väikeelamu vundamenditööd. Tallinn: Ehitame. 107 lk.
23. **Kirsipuu, M.** (2006). Piritale kerkib esimene põhust maja. Eesti Päevaleht, <http://epl.delfi.ee/news/melu/piritale-kerkib-esimene-pohust-maja?id=51037990>.
24. **RT I.** (2015) Hoone energiatõhususe miinimumnõuded.. Eesti Vabariigi Valitsuse majandus- ja taristuministri määrus nr. 55 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“.
25. **Lacinski, P., & Bergeron, M.** (2000). Serious Straw Bale. A Home Construction Guide for All Climates. Canada: Chelsea Green Publishing Company. 371 lk.
26. **Lishman, M.** (2017). [www.martinlishman.com](http://martinlishman.com/moisture-measurement-for-field-use/). Retrieved from <http://martinlishman.com/moisture-measurement-for-field-use/>
27. **Magwood, C., Mack, P., & Therrien, T.** (2005). More Straw Bale Building. A Complete Guide to Designing and Building with Straw. New Society Publishers. 277 lk.
28. **Masso, T., Õiger, K., Rohusaar, J., Mägi, R., Talvik, I., Jaaniso, V., et al.** (2014). Ehituskonstruktori käsiraamat. Autorid ja EHITAME kirjastus. 577 lk.
29. **Miljan, J.** (2012). Ehitusmaterjalid ja nende tootmiseks kuluv energia - Kohalikud looduslikud ehitusmaterjalid ja nende kasutamine, lk 6-13. Tartu: Salibar OÜ.

30. **Minke, G., & Mahlke, F.** (2004). Der Strohballenbau. Ein Konstruktionshandbuch. Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg. 141 lk.
31. **Minke, G., & Mahlke, F.** (2005). Building with straw. Design and technology of a sustainable architecture. Birkhäuser. 192 lk.
32. **\*Mithraratne, N., Vale, B., Vale, R.** (2007). Sustainable living, The role of whole life costs and values. Oxford: Elsevier Ltd, viidatud: Miljan, J. (2012). Ehitusmaterjalid ja nende tootmiseks kuluv energia - Kohalikud looduslikud ehitusmaterjalid ja nende kasutamine, Tartu: Salibar OÜ, lk 6-7 vahendusel.
33. **Pere, R.** (2009). Kohupiimavärv ja savikrohv. Tallinn: Ajakirjade kirjastus. 96 lk.
34. **Pere, R.** (2008). Looduslikud ehitusmaterjalid. 95 lk.
35. **Rand, J.** (2004). Lubi on väärt materjal. Maakodu, 3.
36. **RT I, 0. 4.** (05.06.2015, 4). Ehitisele esitatavad tuleohutusnõuded.
37. **Siikanen, U.** (2012). Puidust ehitamine. Tallinn: Ehitame. 345 lk.
38. **Sun, R.-C.** (2010). Amsterdam: Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biomaterials and Biofuels. 292 lk.
39. **Teor, M.** (2016). Ehitusmaterjalide ja tarindite sisendenergia. Tartu: Eesti Maaülikool. 76 lk.
40. **\*Theis, B. and King, B.** (2006) Fire. In: King, B. (Ed). Design of straw bale buildings. Green Building Press, San Rafael.pp 173-185, viidatud: 5. Carfrae, J. (2011). The Moisture Performance of straw bale construction in a temperate maritime climate. Plymouth: University of Plymouth, lk 46 vahendusel.
41. [www.fibertec.com](http://www.fibertec.com). (n.d.). <http://www.fibertec.com/as-green-as-it-gets-straw-bale-homes/> (10.04.2017).
42. [www.pakendikeskus.ee](http://www.pakendikeskus.ee). Pakendikeskus AS.  
<https://www.pakendikeskus.ee/pakkemasinad/pakkelindi-seadmed> (03.04.2017)
43. [www.puumerkki.fi](http://www.puumerkki.fi). (2017).  
[http://www.puumerkki.fi/et/tooted/hoovelmaterjal/konstruktiooni\\_puit/tugevussorteeritud\\_puit](http://www.puumerkki.fi/et/tooted/hoovelmaterjal/konstruktiooni_puit/tugevussorteeritud_puit) (10.04.2017).
44. [www.sakret.ee](http://www.sakret.ee). Sakret OÜ. <http://www.sakret.ee/product/hml-4-traditsiooniline-lubikrohv/> (05.04.2017)

45. [www.uninaks.ee..](http://www.uninaks.ee..) AS Uninaks.  
<http://www.uninaks.ee/download/T%20Savikrohv%20EE.pdf.dae3e0d08fc5dbb98b9adf4dc12d4d05> (05.04.2017)
46. <http://alusehitus.ee/seinaelemendid/puitkarkass-seinaelement/> (03.04.2017)
47. <https://de.pinterest.com/explore/fachwerk/> (03.04.2017)
48. <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u12-011> (30.04.2017)
49. <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u12-006> (30.04.2017)
50. <http://www.onsetcomp.com/products/sensors/tmc6-hd> (30.04.2017)
51. <https://www.linkedin.com/company/e-clark-and-associates-clark-solutions>  
(30.04.2017)
52. <http://www.ahlborn.com/download/pdfs/kap08/eng/fha646e.pdf> (30.04.2017)
53. <http://www.ahlborn.com/download/pdfs/kap13/eng/WflPlatte.pdf> (30.04.2017)
54. <http://www.ahlborn.com/download/pdfs/kap01/eng/2890e.pdf> (30.04.2017)

## SUMMARY

The aim of this paper was to introduce and analyse the process and technology of straw-bale construction. This research paper outlined the characteristics and parameters of straw-bale building engineering physics and the use of clay and lime plaster in the rendering of exterior walls.

The construction of the test building in Leigo farm was started on the 8th August 2016. The straw bales were obtained between 20th August - 21st August 2016 after the summer harvest and the installation commenced on the 11th September 2016. The construction of the exterior walls was completed on the 22nd September 2016. The rendering of the exterior walls with lime plaster was carried out between the 1st October - 16th October 2016. The heating of the sauna commenced on the 30th November 2016. The interior rendering with clay- and lime plaster was carried out between 3rd December - 19th December 2016. Measuring the parameters of building engineering physics in the test building started on the 29th December 2016 and was finalised as part of this research paper on the 24th April 2017.

Throughout the construction process of the test building, the writers obtained a significant amount of valuable theoretical and practical knowledge about straw-bale building construction and planning. Based on the findings, straw-bale construction in Estonia can be advocated taking into consideration the fact that straw-bale insulated buildings are recommended for planning energy- efficient houses. The latter is important for independent construction initiatives as the biggest expense throughout this process proved to be the cost of labour. Subjective of the particular stages of construction, the cost of materials in building construction using industrial produce is approximately two thirds (60-70 %) and the cost of labour approximately one third (30-40 %) of the overall costs whereas with straw-bale building envelopes, the numbers show an approximate cost of materials of 53% and a similar 47 % cost of labour. When establishing the specific characteristics of building engineering and before starting with the process of construction, it is imperative to familiarise yourself with the factual literature on this method of construction, as well as consulting with an experienced construction specialist(s).

During the project-planning phase prior to the construction of the non-homogeneous exterior walls of the sauna building at Leigo farm, an estimated insulation- and moisture-efficiency check in stationary conditions was carried out. The thermal conductivity of the estimated 580 mm straw bale insulation was calculated at  $U_c=0,16$  ( $W/m^2K$ ). From the partial pressure graphs created during the calculations of the moisture regime of building envelope, due to diffusion, the condensation between the straw bales and the lime plaster used for the exterior rendering was evident, where the actual partial pressure of the water vapour matched the partial pressure of saturated water vapour. Based on this, a mould assessment was also carried out, as well as regular checks of the amount of condensation and vaporised water within this particular section throughout the year. Based on the calculations, the amount of vaporised water is significantly bigger than the amount of condensation between the straw bale and exterior rendering (lime plaster), therefore allowing any potential condensation occurring during the winter months, to dry. Based on the estimations of the mould assessment, with the provisions of preferred temperatures (over  $10^{\circ}C$ ) and relative levels of humidity ( $RH > 80\%$ ) in place, the critical section of the building envelope during the summer period between June and October has once again been identified between the straw bales and the exterior rendering. This will require additional research for more accurate results.

During the measuring period, the average interior temperature in the living room was  $19,6^{\circ}C$  with the relative humidity being  $32.8\%$ . The exterior temperatures hit lows of  $-20.9^{\circ}C$  on the coldest day. The sauna was being heated once a week to simulate the average number of use of the sauna in a standard household. In the sauna, the interior temperature was on average over  $80^{\circ}C$  and over  $100^{\circ}C$  on ceiling level. There was an increase in humidity in the sauna room due to 2,5 litres of water being thrown on the sauna rocks each individual time the sauna was heated.

The test measure calculations established that the thermal conductivity of the wood-framed straw- bale insulated exterior wall was  $U=0,15$  ( $W/m^2K$ ) which is lower than the previously estimated calculations. Having said that, both results serve as an appropriate level of thermal conductivity for housing and non-housing buildings based on the current valid Minister of Economic Affairs and Infrastructure regulation

no. 55 „Minimum requirements for building energy-efficiency” The thermal conductivity calculated based on the results from the measuring period is likely to have been affected by the construction humidity that has not yet dried out from inside the walls. In addition to that, the calculations will have been affected by the construction activities and heating the sauna room during the measuring period. Taking these factors into consideration, the thermal conductivity of the Leigo farm sauna building exterior walls should have decreased when measured during the new heating period after the summer term.

The results derived from the partial pressure graphs created based on the measurements gathered during the measuring period indicate condensation due to diffusion in the living room between March-April 2017. Due to the difference in partial pressure, no condensation was identified in the exterior building envelope of the sauna room. The critical area was the section between the straw bales and the exterior rendering (lime plaster) where the relative humidity during the measuring period between 1st January - 21st April 2017 was continually over 99%, confirming the results calculated in stationary conditions.

Evidence from a closer inspection of the building envelope of the sauna room carried out on 21st April 2017 shows that the temperature of 90.11°C in the sauna room increased the temperature between the straw bales and the interior rendering (clay plaster) to 66,55°C and in the middle of the straw bales only up to 23,25°C. Based on a visual assessment of the lime plaster rendering of the sauna room, no mechanical damage was identified. In the clay plaster rendering, a small number of individual deformations were spotted on the joints between the seat and the wall, resulting from water drops in contact with the clay plaster.

Based on the results of this research paper, we can conclude that building envelopes using small straw bales are an appropriate construction method within the Estonian climate. The most common 500 mm wide straw bales can be used for exterior wall construction and to achieve fire-and weatherproof conditions, clay and lime plaster rendering is appropriate. With regards to the moisture regime, the area between the straw bales and the exterior rendering requires increased attention. The writers of this research paper recommend using lime plaster for exterior rendering of straw-bale constructions as it is more durable against

weather elements (sun, wind, rain, snow, etc.) than clay plaster in comparison. For interior rendering, both lime plaster and clay plaster are appropriate depending on the desired results. Clay plaster should be more durable than lime plaster against the high temperatures in the sauna room, however the first deficiency of clay plaster is the evident decrease in durability when in contact with water. This paper did not research the method of tadelakt rendering in the sauna room, which should be better suited for high temperatures and direct contact with water.

**LISAD**



## Lisa 1. Põhupakkidest saunahoone mittehomogeense välisseina soojusläbivuse arvutus (EVS-EN ISO 6946:2008)

*Tabel L1.1. Põhupakkidest välisseinte soojusläbivuse arvutused*

Materjalid seina kihtides	Kihi paksus/ materjali ristlõige	Samm	Arvutuslik soojuseri juhtivus	Arvutuslik soojustakistus
	d (mm)	s (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
Sisepind				0,13
Savikrohv	40		0,8	0,05
Põhupakk	500		0,08	6,25
Puitpost	50x100	0,6	0,13	0,77
Lubikrohv	40		0,8	0,05
Välispind				0,04
<b>Piirde korrigeeritud soojusläbivus <math>U_c=0,16</math> (W/m<sup>2</sup>K)</b>				

### Arvutuskäik.

Mittehomogeense piirde kogusoojatakistus:

$$R_T = \frac{6,48 + 6,46}{2} = 6,47 \left( \frac{m^2 K}{W} \right)$$

Kontrollin arvutusmetoodika sobivust standartile EN ISO 6946:

$$e = \frac{6,48 - 6,46}{2 \cdot 6,47} \cdot 100\% = 0,15\% \leq 20\%,$$

Kogusoojatakistuse ülemine piirväärtus:

$$R_T' = \frac{\frac{550 + 50}{\frac{550}{6,52} + \frac{50}{6,04}}}{\frac{550}{6,52} + \frac{50}{6,04}} = 6,48 \left( \frac{m^2 K}{W} \right)$$

Soojustuse sektsioon:

$$R_{\text{soojustuse sektsioon}} = 0,13 + \frac{0,04}{0,8} + \frac{0,5}{0,08} + \frac{0,04}{0,8} + 0,04 = 6,52 \left( \frac{m^2 K}{W} \right)$$

Karkassipostide sektsioon:

$$R_{\text{karkassipostide sektsioon}} = 0,13 + \frac{0,04}{0,8} + \frac{0,4}{0,08} + \frac{0,1}{0,13} + \frac{0,04}{0,8} + 0,04 = 6,04 \left( \frac{m^2 K}{W} \right)$$

Kogusoojatakistuse alumine piirväärtus:

$$R_T'' = 0,13 + \frac{0,04}{0,8} + \frac{0,4}{0,08} + 1,19 + \frac{0,04}{0,8} + 0,04 = 6,46 \left( \frac{m^2 K}{W} \right)$$

## Lisa 1. Järg

Põhupakist 100mm paksuse soojustuse kihi soojustakistus:

$$R_{100mmsoojust} = \frac{550+50}{\frac{550}{\left(\frac{0,1}{0,08}\right)} + \frac{50}{\left(\frac{0,1}{0,13}\right)}} = 1,19 \left( \frac{m^2 K}{W} \right)$$

Piirde soojuslähivus:

$$U = \frac{1}{6,47} = 0,155 \left( \frac{W}{m^2 K} \right)$$

Piirde korrigeeritud soojuslähivus:

$$U_c = 0,155 + 0,0096 = 0,16 \left( \frac{W}{m^2 K} \right)$$

Piirdetarindi erinevatest teguritest tingitud soojuslähivus:

$$\Delta U = 0,0064 + 0,0032 = 0,0096 \left( \frac{W}{m^2 K} \right)$$

Korrigeerimisel saadud erinevatest teguritest tingitud soojuslähivuse paranduse protsentuaalne suhe piirde soojuslähivusse:

$$\frac{0,0096}{0,164} \cdot 100\% = 5,9\% > 3\% \Rightarrow U_c = U + \Delta U$$

Tühimikest ja õhupragudest tingitud parandus:

$$\sum U_g = 0,006 + 0,0004 = 0,0064 \left( \frac{W}{m^2 K} \right)$$

$$\Delta U'' = 0,01 \left( \frac{W}{m^2 K} \right) \Rightarrow \text{Soojustuse paigalduse tase 1}$$

$$\Delta U_{g400mmsoojust} = 0,01 \cdot \left( \frac{5}{6,47} \right)^2 = 0,006 \left( \frac{W}{m^2 K} \right)$$

$$\Delta U_{g100mmsoojust} = 0,01 \cdot \left( \frac{1,25}{6,47} \right)^2 = 0,0004 \left( \frac{W}{m^2 K} \right)$$

Mehaanilistest kinnititest tingitud parandus:

$$\Delta U_f = 0 \left( \frac{W}{m^2 K} \right)$$

## Lisa 1. Järg

Pööratud katusest tingitud parandus:

$$\Delta U_r = 0 \left( \frac{W}{m^2 K} \right)$$

Soojustuse õhujuhtivusest tingitud parandus:

$$\sum U_a = 0,003 + 0,0003 = 0,0032 \left( \frac{W}{m^2 K} \right)$$

$$\Delta U_a'' = 0,005 \left( \frac{W}{m^2 K} \right)$$

$$\Delta U_{a400mmsoojustust} = 0,005 \cdot \left( \frac{5}{6,47} \right)^2 = 0,003 \left( \frac{W}{m^2 K} \right)$$

$$\Delta U_{a100mmsoojustust} = 0,005 \cdot \left( \frac{1,25}{6,47} \right)^2 = 0,0002 \left( \frac{W}{m^2 K} \right)$$

Külmasildadest põhjustatud parandus:

$$\Delta U_{\Psi_X} = 0 \left( \frac{W}{m^2 K} \right) .$$

**Lisa 2. Eesti niiskustehnilise baasaasta analüüs lähipiirkonna „Tartu“ põhjal (EVS-EN ISO 13788:2012 ja ET-2 0102-0329 2000)**

**Tabel L2.1.** Niiskustehnilise baasaasta kuude lõikes arvatatud tulemused

Kuu	$\theta_e$	$\phi_e$		$\theta_i$	$psat(\theta_e)$	$p_e$	$\Delta p$	$p_i$	$psat(\theta_{si})$	$\theta_{si,min}$	$f_{si,min}$	$\theta_{si}$	$\theta_{se}$	$psat(\theta_i)$	$\phi_i$	
	[°C]	[%]	-	[°C]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[°C]		[°C]	[°C]	[Pa]	[%]	-
Jaanuar	-6,7	86	0,86	20	347	298	810	1108	1385	11,8	0,694	19,4	-6,5	2337	47,4	0,47
Veebruar	-6,7	84	0,84	20	347	291	810	1101	1376	11,7	0,69	19,4	-6,5	2337	47,1	0,47
Märts	-3,2	78	0,78	20	468	365	810	1175	1468	12,7	0,686	19,5	-3,0	2337	50,3	0,50
Aprill	3,8	74	0,74	20	801	593	784	1377	1722	15,2	0,701	19,7	3,9	2337	58,9	0,59
Mai	10,5	69	0,69	20	1269	876	614	1490	1862	16,4	0,619	19,8	10,6	2337	63,8	0,64
Juuni	14,8	71	0,71	20	1683	1195	421	1616	2020	17,7	0,551	19,9	14,8	2337	69,1	0,69
Juuli	17,1	76	0,76	20	1949	1481	291	1772	2215	19,1	0,703	19,9	17,1	2337	75,8	0,76
August	15,4	80	0,8	20	1749	1399	389	1788	2235	19,3	0,844	19,9	15,4	2337	76,5	0,77
September	10,7	83	0,83	20	1286	1067	607	1674	2093	18,2	0,81	19,8	10,8	2337	71,6	0,72
Oktoober	5,2	86	0,86	20	929	799	762	1561	1952	17,1	0,805	19,7	5,3	2337	66,8	0,67
November	0,1	86	0,86	20	616	529	810	1339	1674	14,7	0,735	19,6	0,2	2337	57,3	0,57
Detsember	-4,1	88	0,88	20	433	381	810	1191	1489	12,9	0,706	19,5	-3,9	2337	51,0	0,51

**Lisa 3. Põhupakkidest saunahoone mittehomogeense välisseina  
niiskustehniline arvutuslik analüüs tsoonis A (EVS-EN ISO 13788:2012)**

**Tabel L3.1.** Jaanuari kuu põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus

Seina kihid	d	μ	Sd	λd	R	θ	Psat	Z	P	Φ
	mm		m	W/(mK)	m²K/W	°C	Pa	m²hPa / kg10 <sup>^(6)</sup>	Pa	%
Siseõhk						20,00	2337		1108	47,4
Sisepinna soojustakistus					0,13	19,47	2261		1108	49,0
Savikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	19,26	2232	0,480	971	43,5
Põhupakk	500	2,5	1,25	0,08	6,25			1,875		
Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	-6,33	358	0,480	358	100,0
Välispinna soojustakistus					0,04	-6,54	351		298	84,8
Välisõhk						-6,70	347		298	86,0

**Tabel L3.2.** Veebruari kuu põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus

Seina kihid	d	μ	Sd	λd	R	θ	Psat	Z	P	Φ
	mm		m	W/(mK)	m²K/W	°C	Pa	m²hPa / kg10 <sup>^(6)</sup>	Pa	%
Siseõhk						20,00	2337		1101	47,1
Sisepinna soojustakistus					0,13	19,47	2261		1101	48,7
Savikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	19,26	2232	0,480	964	43,2
Põhupakk	500	2,5	1,25	0,08	6,25			1,875		
Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	-6,33	358	0,480	358	100,0
Välispinna soojustakistus					0,04	-6,54	351		291	82,8
Välisõhk						-6,70	347		291	84,0

### Lisa 3. Järg

**Tabel L3.3.** Märtsi kuu põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus

Seina kihid	d	μ	Sd	λd	R	θ	Psat	Z	P	Φ
	mm		m	W/(mK)	m²K/W	°C	Pa	m²hPa / kg10 <sup>6</sup>	Pa	%
Siseõhk						20,00	2337		1175	50,3
Sisepinna soojustakistus					0,13	19,54	2271		1175	51,7
Savikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	19,36	2246	0,480	1038	46,2
Põhupakk	500	2,5	1,25	0,080	6,25	-2,88	480	1,875	480	100,0
Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	-3,06	473	0,480	365	77,1
Välispinna soojustakistus					0,04	-3,20	468		365	78,0
Välisõhk										

**Tabel L3.4.** Aprilli kuu põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus

Seina kihid	d	μ	Sd	λd	R	θ	Psat	Z	P	Φ
	mm		m	W/(mK)	m²K/W	°C	Pa	m²hPa / kg10 <sup>6</sup>	Pa	%
Siseõhk						20,00	2337		1377	58,9
Sisepinna soojustakistus					0,13	19,68	2291		1377	60,1
Savikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	19,55	2273	0,480	1245	54,8
Põhupakk	500	2,5	1,25	0,080	6,25	4,02	814	1,875	726	89,2
Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	3,90	807	0,480	593	73,5
Välispinna soojustakistus					0,04	3,80	801		593	74,0
Välisõhk										

### Lisa 3. Järg

**Tabel L3.5.** Mai kuu põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus

Seina kihid	d	$\mu$	Sd	$\lambda d$	R	$\theta$	Psat	Z	P	$\Phi$
	mm		m	W/(mK)	m <sup>2</sup> K/W	°C	Pa	m <sup>2</sup> hPa / kg10 <sup>^(6)</sup>	Pa	%
Siseõhk						20,00	2337		1490	63,8
Sisepinna soojustakistus					0,13	19,81	2310		1490	64,5
Savikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	19,74	2299	0,480	1386	60,3
Põhupakk	500	2,5	1,25	0,08	6,25	10,63	1280	1,875	980	76,5
Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	10,56	1274	0,480	876	68,7
Välispinna soojustakistus					0,04	10,50	1269		876	69,0
Välisõhk										

**Tabel L3.6.** Juuni kuu põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus

Seina kihid	d	$\mu$	Sd	$\lambda d$	R	$\theta$	Psat	Z	P	$\Phi$
	mm		m	W/(mK)	m <sup>2</sup> K/W	°C	Pa	m <sup>2</sup> hPa / kg10 <sup>^(6)</sup>	Pa	%
Siseõhk						20,00	2337		1616	69,1
Sisepinna soojustakistus					0,13	19,90	2322		1616	69,6
Savikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	19,86	2316	0,480	1545	66,7
Põhupakk	500	2,5	1,25	0,08	6,25	14,87	1690	1,875	1266	74,9
Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	14,83	1686	0,480	1195	70,9
Välispinna soojustakistus					0,04	14,80	1683		1195	71,0
Välisõhk										

### Lisa 3. Järg

**Tabel L3.7.** Juuli kuu põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus

Seina kihid	d	μ	Sd	λd	R	θ	Psat	Z	P	Φ
	mm		m	W/(mK)	m²K/W	°C	Pa	m²hPa / kg10^(6)	Pa	%
Siseõhk						20,00	2337		1772	75,8
Sisepinna soojustakistus					0,13	19,94	2329		1772	76,1
Savikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	19,92	2325	0,480	1723	74,1
Põhupakk	500	2,5	1,25	0,08	6,25	17,14	1954	1,875	1530	78,3
Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	17,12	1951	0,480	1481	75,9
Välispinna soojustakistus					0,04	17,10	1949		1481	76,0
Välisõhk										

**Tabel L3.8.** Augusti kuu põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus

Seina kihid	d	μ	Sd	λd	R	θ	Psat	Z	P	Φ
	mm		m	W/(mK)	m²K/W	°C	Pa	m²hPa / kg10^(6)	Pa	%
Siseõhk						20,00	2337		1788	76,5
Sisepinna soojustakistus					0,13	19,91	2324		1788	76,9
Savikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	19,87	2319	0,480	1722	74,3
Põhupakk	500	2,5	1,25	0,08	6,25	15,46	1756	1,875	1465	83,4
Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	15,43	1752	0,480	1399	79,9
Välispinna soojustakistus					0,04	15,40	1749		1399	80,0
Välisõhk										



### Lisa 3. Järg

**Tabel L3.9.** Septembri kuu põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus

Seina kihid	d	μ	Sd	λd	R	θ	Psat	Z	P	Φ
	mm		m	W/(mK)	m²K/W	°C	Pa	m²hPa / kg10^(6)	Pa	%
Siseõhk						20,00	2337		1674	71,6
Sisepinna soojustakistus					0,13	19,81	2310		1674	72,5
Savikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	19,74	2300	0,480	1571	68,3
Põhupakk	500	2,5	1,25	0,08	6,25	10,83	1297	1,875	1170	90,2
Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	10,76	1291	0,480	1067	82,7
Välispinna soojustakistus					0,04	10,70	1286		1067	83,0
Välisõhk										

**Tabel L3.10.** Oktoobri kuu põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus

Seina kihid	d	μ	Sd	λd	R	θ	Psat	Z	P	Φ
	mm		m	W/(mK)	m²K/W	°C	Pa	m²hPa / kg10^(6)	Pa	%
Siseõhk						20,00	2337		1561	66,8
Sisepinna soojustakistus					0,13	19,70	2295		1561	68,0
Savikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	19,59	2278	0,480	1432	62,9
Põhupakk	500	2,5	1,25	0,08	6,25	5,40	897	1,875	897	100,0
Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	5,29	890	0,480	799	89,8
Välispinna soojustakistus					0,04	5,20	884		799	90,4
Välisõhk										

### Lisa 3. Järg

**Tabel L3.11.** Novembri kuu põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus

Seina kihid	d	μ	Sd	λd	R	θ	Psat	Z	P	Φ
	mm		m	W/(mK)	m²K/W	°C	Pa	m²hPa / kg10^(6)	Pa	%
Siseõhk						20,00	2337		1339	57,3
Sisepinna soojustakistus					0,13	19,60	2280		1339	58,7
Savikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	19,45	2259	0,480	1202	53,2
Põhupakk	500	2,5	1,25	0,08	6,25	0,37	627	1,875	627	100,0
Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	0,22	620	0,480	529	85,3
Välispinna soojustakistus					0,04	0,10	615		529	86,1
Välisõhk										

**Tabel L3.12.** Detsembri kuu põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus

Seina kihid	d	μ	Sd	λd	R	θ	Psat	Z	P	Φ
	mm		m	W/(mK)	m²K/W	°C	Pa	m²hPa / kg10^(6)	Pa	%
Siseõhk						20,00	2337		1191	51,0
Sisepinna soojustakistus					0,13	19,52	2268		1191	52,5
Savikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	19,33	2242	0,480	1054	47,0
Põhupakk	500	2,5	1,25	0,08	6,25	-3,77	446	1,875	446	100,0
Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	0,05	-3,95	439	0,480	381	86,9
Välispinna soojustakistus					0,04	-4,10	433		381	88,0
Välisõhk										

**Lisa 4. Põhupakkidest saunahoone mittehomogeense välisseina õhuniiskuse kondenseerumise ja aurustumise arvutuslik kontroll (ET-2 0404-0764)**

*Tabel L4.1. Põhupakkidest välisseina kondenseeruva ja väljakuivatava vee hulga arvatud tulemused kuude lõikes*

Kuu	$p_e$	$p_i$	$p_{cond}$	$\Sigma Z_i =$	$\Sigma Z_e =$	$i_i$	$i_e$	$t_{(cond/dry)}$	$G_{(cond/dry)}$	Märkus
	[Pa]	[Pa]	[Pa]	$[m^2hPa / kg10^{(6)}]$	$[m^2hPa / kg10^{(6)}]$	$[kg10^{(6)} / m^2h]$	$[kg10^{(6)} / m^2h]$	[h]	$[kg/m^2]$	
Jaanuar	298	1108	358	2,355	0,480	-319	124	744	0,144	Kondenseerumine
Veebruar	291	1101	358	2,355	0,480	-316	139	672	0,119	Kondenseerumine
Märts	365	1175	480	2,355	0,480	-295	241	744	0,040	Kondenseerumine
Aprill	593	1377	814	2,355	0,480	-239	461	720	-0,159	Kuivamine
Mai	876	1490	1280	2,355	0,480	-89	843	744	-0,561	Kuivamine
Juuni	1195	1616	1690	2,355	0,480	32	1033	720	-0,766	Kuivamine
Juuli	1481	1772	1954	2,355	0,480	77	985	744	-0,790	Kuivamine
August	1399	1788	1756	2,355	0,480	-14	744	744	-0,543	Kuivamine
September	1067	1674	1297	2,355	0,480	-160	478	720	-0,229	Kuivamine
Oktoober	799	1561	897	2,355	0,480	-282	203	744	0,059	Kondenseerumine
November	529	1339	627	2,355	0,480	-302	204	720	0,071	Kondenseerumine
Detsember	381	1191	446	2,355	0,480	-317	134	744	0,136	Kondenseerumine

$$\Sigma G_{(cond/dry)} = -2,481 \quad kg/m^2$$

## Lisa 5. Põhupakkidest saunahoone ehituspäevik

*Tabel L5.1. Ehituspäevik*

Kuupäev	EHITUSTÖÖDEGA SEOTUD TEGEVUSTE KIRJELDUS
08.08.2016	Kohtumine Loodusehitus OÜ meistri Knut Klaisiga praktilise informatsiooni omandamiseks põhupakkidest soojustusega puitkarkasselamute ehitamise tehnoloogias – erinevad võimalused, konkreetsed lahendused, krohvimise tehnoloogia ja võimalikud materjalid. Erialase kirjandusega tutvumine. Tööaeg 08.00 – 22.00
12.08.2016	Ehitusplatsi raadamine ja pinnase ettevalmistus ning postvundamentide (Ø160mm) ehitus vastavalt projektile. Tööaeg 08.00 – 23.30
13.08.2016	Puitkarkassist aluspõranda ehitustööde teostamine. Tööaeg 08.00 – 23.00
14.08.2016	Põhupakkimismasina remont- ja hooldustööd. Proovipakkide valmistamine mõõtudega 650x500x400. Tööaeg 08.00 – 15.00
19.08.2016	Viljakoristus põllul. Põllu kaugus ehitatavast objektist ~3km.
20.08.2016	Põhu kaarutamine ja põhu pakkimine. Tööaeg 08.00 – 20.00
21.08.2016	Põhupakkide vedu viljapõllult Leigo tallu ja ladustamine ning ilmastiku eest kaitsmiseks kinni katmine objektile. Tööaeg 12.00 – 21.00
27.08.2016	Puitkarkassist (50x100mm) kandvate seinte ehitus. Tööaeg 11.00 – 21.00
28.08.2016	Vahelaetalade (C24 45x145mm) paigaldus ja sarikate (C24 45x145mm) ehitus. Tööaeg 10.00 – 20.00
03.09.2016	Sarikate paigaldus ja otsaseinte ehitus. Tööaeg 11.00 – 21.00
04.09.2016	Sarikate kinnitamine ja katusele aluskatte ning distantssliistu paigaldus. Tööaeg 10.00 – 20.30
08.09.2016	Katusele roovituse (50x50mm) paigaldus. Tööaeg 12.00 – 16.30
09.09.2016	Katusele roovituse (50x50mm) paigaldus ja rihtimine. Tööaeg 10.00 – 16.30
10.09.2016	Puitkarkassist seinte jäigastamine kaldsidemetega ja põhupakkide aluspinna ettevalmistus. Tööaeg 10.00 – 20.00
11.09.2016	Põhupakkide paigaldus seina ja pingutamine. Tööaeg 12.00 – 20.00
17.09.2016	Põhupakkide paigaldus seina ja pingutamine. Tööaeg 10.00 – 19.00
18.09.2016	Põhupakkide paigaldus seina ja pingutamine. Tööaeg 11.00 – 19.30
22.09.2016	Põhupakkidest seinte rihtimine ja mõõtu lõikamine. Puitkarkassist seintele jäigastavate elementide paigaldus. Tööaeg 09.30 – 18.30
01.10.2016	Lubikrohviga väljast põhupakkidest välisseinte esimese kihi (nakkekiht) krohvimine. Tööaeg 11.00 – 19.30

**Tabeli L5.1. Järg**

02.10.2016	Lubikrohviga väljast põhupakkidest välisseinte esimese kihi (nakkekiht) krohvimine. Tööaeg 11.00 – 19.30
07.10.2016	Lubikrohviga väljast põhupakkidest välisseinte teise kihi (täitekiht) krohvimine. Tööaeg 11.00 – 19.00
08.10.2016	Lubikrohviga väljast põhupakkidest välisseinte teise kihi (täitekiht) krohvimine. Tööaeg 11.00 – 19.00
14.10.2016	Lubikrohviga väljast põhupakkidest välisseinte kolmanda kihi (armeerimiskiht) krohvimine. Tööaeg 09.00 – 18.30
15.10.2016	Lubikrohviga väljast põhupakkidest välisseinte kolmanda kihi (armeerimiskihi) krohvimine. Tööaeg 09.00 – 18.30
16.10.2016	Lubikrohviga väljast põhupakkidest välisseinte neljanda kihi (viimistluskihi) krohvimine. Tööaeg 08.30 – 19.00
05.11.2016	Otsaseinte soojustamine ja tuuletõkke paigaldus. Tööaeg 10.00 – 16.30
06.11.2016	Vahelae ehitus ja OSB plaadi paigaldus II korruse põrandale. Tööaeg 11.00-16.30
12.11.2016	Elektrikaabli (AXPK 4x16m <sup>2</sup> ) paigaldus 180m. I korruse põranda soojustamine ja aurutõkkemembraani paigaldus. Tööaeg 09.00 – 17.00
13.11.2016	I korruse põranda ehitus ja põrandalaua paigaldus. Tööaeg 09.00 – 16.30
14.11.2016	Katusekivi paigaldus koos tarvikutega 70m <sup>2</sup> . Tööaeg 09.00 – 16.30
15.11.2016	Katusekivi paigaldus koos tarvikutega 70m <sup>2</sup> . Tööaeg 09.00 – 16.30
26.11.2016	Katuselae soojustamine min.villaga. Elektritööd. Tööaeg 10.00 – 18.00
27.11.2016	Katuselaele aurutõkke ja distantsliistude paigaldus. Tööaeg 10.00 – 17.00
29.11.2016	Katuselae viimistlus voodrilauaga. Tööaeg 09.00 – 16.30
30.11.2016	Katuselae viimistlus voodrilauaga. Hoone kütmisega alustamine. Tööaeg 09.00-16.30
03.12.2016	Seestpoolt põhupakkidest seinte lõikamine ja ettevalmistus krohvimiseks. Savikrohviga ja lubikrohviga põhuseinte esimese kihi (nakkekiht) krohvimine. Tööaeg 12.00 – 17.00
04.12.2016	Seestpoolt savikrohviga ja lubikrohviga põhuseinte esimese kihi (nakkekiht) krohvimine. Tööaeg 10.00 – 17.30
08.12.2016	Seestpoolt savikrohviga ja lubikrohviga põhuseinte teise kihi (täitekiht) krohvimine. Tööaeg 10.00 – 16.00
09.12.2016	Seestpoolt savikrohviga ja lubikrohviga põhuseinte teise kihi (täitekiht) krohvimine. Tööaeg 09.00 – 15.00

**Tabeli L5.1. Järg**

11.12.2016	Seestpoolt lubikrohviga põhuseinte kolmanda kihi (armeerimiskiit) krohvimine. Tööaeg 09.00 – 17.30
15.12.2016	Seestpoolt savikrohviga põhuseinte kolmanda kihi (armeerimiskiit) krohvimine. Tööaeg 11.00 – 19.30
17.12.2016	Seestpoolt lubikrohviga põhuseinte neljenda kihi (viimistluskiit) krohvimine. Tööaeg 14.00 – 21.00
18.12.2016	Seestpoolt savikrohviga põhuseinte neljenda kihi (viimistluskiit) krohvimine. Tööaeg 12.30 – 19.30
19.12.2016	Seestpoolt savikrohviga ja lubikrohviga põhuseinte neljenda kihi (viimistluskihi) krohvimine. Tööaeg 11.00 – 19.30
23.12.2016	Vaheseina ja saunalaie ehitus ning soojustamine. Tööaeg 10.00 – 15.00
27.12.2016	Saunalaie ehitus ja sisemised elektritööd. Tööaeg 12.00 – 20.30
29.12.2016	Ehitusfüüsikaliste parameetrite mõõtmiseks seadmete paigaldus. Tööaeg 11.00-14.30
04.01.2017	Leiliruumi põranda ehitus ja seinte viimistlus voodrilauaga. Tööaeg 12.00-20.30
30.01.2017	Leiliruumi põranda ehitus ja viimistlus. Tööaeg 10.00 – 14.00
05.02.2017	Sisemised elektritööd. Leiliruumi seinte viimistlus voodrilauaga. Tööaeg 11.00-20.30
25.02.2017	Leiliruumi lava ehitustööd. Hoone termografeerimine. Tööaeg 12.30 – 20.30
25.03.2017	Leiliruumi lava ehitustööd. Tööaeg 12.00 – 17.00

## Lisa 6. Põhupakkidest saunahoone ehitustöödega seotud kulud

Tabel L6.1. Saunahoone kulutabel

Nimetus	Ühik	Kogus	Materjal ühiku hind (€)	Materjal kokku (€)	Töötasu (€)	Töö aeg (h)	Töötasu kokku (€)	Summa (€)
<b>Ettevalmistustööd</b>								
Ettevalmistus ja raadamine	kmpl	1.0	0.0	0.0	10.0	6.0	60.0	60.0
<b>Alused ja vundamendid</b>								
Hoonealune kasvumulla koorimine	m3	2.0	0.0	0.0	10.0	4.0	40.0	40.0
Vundamendi süvendi kaevamine	m3	1.0		0.0	10.0	8.0	80.0	80.0
Postvundament R/B Ø160mm h1700mm	m3	0.4	800.0	320.0	10.0	28.0	280.0	600.0
<b>Põhupakkide valmistamine</b>								
Viljakoristus, põhu kaarutamine ja pakkimine	tk	550.0	0.2	110.0	10.0	66.0	660.0	770.0
<b>Kandetarindid</b>								
<b>Aluspõrand</b>								
45x195mm puitprusside paigaldus	jm	62.0	5.0	310.0	10.0	31.0	310.0	620.0
Tuuletõkkemembraani ning 22x50 mm distantslüüstu paigaldus	m2	26.0	6.5	169.0	10.0	6.5	65.0	234.0
15 mm veekindla vineeri paigaldus	m2	26.0	17.0	442.0	10.0	6.5	65.0	507.0
Põranda soojustamine mineraalvillaga 200 mm	m2	26.0	10.0	260.0	10.0	5.2	52.0	312.0
Aurutõkkemembraani ning 22x50 mm distantslüüstu paigaldus	m2	26.0	4.0	104.0	10.0	5.2	52.0	156.0
Põrandalaua HLL 20x145 mm paigaldus	m2	16.5	9.0	148.5	10.0	11.6	115.5	264.0
<b>Kandvad välisseinad</b>								
Alumised vööprussid 45x145 mm	jm	42.0	4.0	168.0	10.0	5.0	50.4	218.4
Puitpostid 50x100 mm	jm	130.0	3.0	390.0	10.0	45.5	455.0	845.0
650x450x400 mm põhupakkide paigaldus	m2	52.5	4.0	210.0	10.0	94.5	945.0	1155.0
Vahevöötala 50x100 mm paigaldus	jm	21.0	3.0	63.0	10.0	4.2	42.0	105.0
<b>Vahelagi</b>								
Vahelaetalad 45x145 mm paigaldus	jm	62.0	4.0	248.0	10.0	15.5	155.0	403.0
18 mm OSB3 plaadi paigaldus	m2	22.5	7.5	168.8	10.0	13.5	135.0	303.8

***Tabeli L6.1. Järg***

<b>Vahesein</b>								
50x100 mm puitpostid	jm	15.0	3.0	45.0	10.0	6.0	60.0	105.0
Aurutõkkemembraani ning 22x50 mm distanttsliistu paigaldus	m2	7.5	4.0	30.0	10.0	3.0	30.0	60.0
100 mm mineraalvilla paigaldus	m2	7.5	5.0	37.5	10.0	4.5	45.0	82.5
<b>Katusetarindid</b>								
45x145 mm sarikate paigaldus	jm	180.0	4.0	720.0	10.0	54.0	540.0	1260.0
Hingav aluskate ning 22x50 mm distanttsliistu paigaldus	m2	80.0	4.0	320.0	10.0	12.0	120.0	440.0
50x50 mm puitroovi paigaldus	m2	80.0	2.5	200.0	10.0	24.0	240.0	440.0
Katuse rea-, ääre- ja harjakivi paigaldus. Bettonkivi roheline	m2	80.0	14.0	1120.0	10.0	44.0	440.0	1560.0
Vihmaveerenni ja -toru paigaldus, 100mm ümarprofiil	jm	20.0	12.0	240.0	10.0	18.0	180.0	420.0
Tuulekasti laudade paigaldus, peensaetud 21x95 + värvimine 2 kihti	m2	18.0	15.0	270.0	10.0	27.0	270.0	540.0
<b>Välisseinte pinnakatted</b>								
Põhupakkide krohvimine lubikrohviga Sakret HML-4	m2	52.5	11.5	603.8	10.0	168.0	1680.0	2283.8
13mm tuuletõkkeplaadi Isover VKL paigaldus ning 22x50 mm distanttsliistu paigaldus	m2	52.5	8.0	420.0	10.0	21.0	210.0	630.0
Servamata laudise paigaldus + värvimine 2 kihti	m2	11.0	19.0	209.0	10.0	11.0	110.0	319.0
Krohvitud pindade viimistlemine fassaadivärviga	m2	52.5	4.0	210.0	10.0	21.0	210.0	420.0
<b>Siseseinte pinnakatted</b>								
Põhupakkide krohvimine lubikrohviga Sakret HML-4	m2	21.0	11.5	241.5	10.0	79.8	798.0	1039.5
Põhupakkide krohvimine savikrohviga Uninaks	m2	21.0	13.0	273.0	10.0	79.8	798.0	1071.0
150 mm mineraalvilla paigaldus	m2	48.0	7.5	360.0	10.0	19.2	192.0	552.0



***Tabeli L6.1. Järg***

Aurutõkkemembraani ning 22x50 mm distanttsliistu paigaldus	m2	48.0	4.0	192.0	10.0	19.2	192.0	384.0
Sisevoodrilaua STV. 12x95 mm paigaldus + peitsimine	m2	48.0	12.0	576.0	10.0	24.0	240.0	816.0
<b>Leiliruum</b>								
<b>Põrand</b>								
18 mm OSB3 plaadi paigaldus	m2	4.8	7.5	36.0	10.0	2.9	28.8	64.8
Isevalguv fiiberkiuga tasandussegu Mira X-plan paigaldus, kallete tegemiseks	m2	4.8	20.0	96.0	10.0	9.1	91.2	187.2
Põranda hüdroisolatsioon Kiilto Fibergum	m2	4.8	12.0	57.6	10.0	7.2	72.0	129.6
Plaatimistööd, plaadi maksumus 10 Eur/m2	m2	4.8	15.0	72.0	10.0	7.2	72.0	144.0
<b>Sein, lagi pinnakatted</b>								
Tsementkiudplaadi paigaldus	m2	2.0	10.0	20.0	10.0	1.6	16.0	36.0
Leiliruumi seinte ja lagede vooderdamine, plank hõõveldatud lepp	m2	25.0	13.0	325.0	10.0	25.0	250.0	575.0
Lava ehitus	kmpl	1.0	125.0	125.0	10.0	20.0	200.0	325.0
Elektrikeris	kmpl	1.0	200.0	200.0	10.0	1.0	10.0	210.0
<b>Tugevvoolu paigaldus</b>								
Elektri peajaotussüsteemid	kmpl	1.0	150.0	150.0	10.0	10.0	100.0	250.0
Kaabeldus	kmpl	1.0	400.0	400.0	10.0	25.0	250.0	650.0
<b>Uksed, aknad</b>								
Puitraamil pakettaknad	m2	3.8	150.0	562.5	10.0	4.5	45.0	607.5
Leiliruumi klaasuks	kmpl	1.0	150.0	150.0	10.0	2.0	20.0	170.0
Soojustatud puitvooder välisuks	kmpl	1.0	250.0	250.0	10.0	1.5	15.0	265.0
<b>Ehituskorraldus</b>								
Tellingute montaaž ja demontaaž, rent	kmpl	1.0	200.0	200.0	10.0	0.0	0.0	200.0
Rendiseadmed (niiskusimur, termokaamera jne)	kmpl	1.0	300.0	300.0	10.0	0.0	0.0	300.0
Load, kooskõlastused, dokumendid	kmpl	1.0	100.0	100.0	10.0	0.0	0.0	100.0
Transport	kmpl	1.0	250.0	250.0	10.0	0.0	0.0	250.0
<b>Kokku</b>				12473.1		1108.7	11086.9	<b>23560.0</b>
<b>Käibemaks 20%</b>								<b>4712.0</b>
<b>Kokku käibemaksuga</b>								<b>28272.0</b>

**Lisa 7. Põhupakkidest saunahoone mittehomogeense välisseina mõõtmistulemused „puhkeruumis“ 30 min intervalliga 01.01.2017-24.04.2017 ja niiskustehniline analüüs tsoonis A**

**Tabel L7.1. Põhupakkidest välisseina mõõtmistulemused puhkeruumis**

2017	$\theta_e$	$\phi_e$	$\theta_{se\_1}$	$\theta_{1\_1}$	$\phi_{1\_1}$	$\theta_{1\_2}$	$\phi_{1\_2}$	$\theta_{1\_3}$	$\phi_{1\_3}$	$\theta_{si\_1}$	$\theta_{i\_1}$	$\phi_{i\_1}$	$\theta_{i\_1u}$	$\phi_{i\_1u}$	$v_{l\_1}$	$v_{l\_2}$	$v_{l\_3}$	$v_e$	$v_{i\_1}$	$v_{i\_1u}$
Kuu	[°C]	[%]	[°C]	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[g/m³]	[g/m³]	[g/m³]	[g/m³]	[g/m³]	[g/m³]
Jaanuar	-3,39	90,24	-3,23	-1,58	99,07	10,69	84,71	20,62	51,60	20,76	21,78	30,06	22,73	30,06	4,49	8,60	9,45	3,64	5,89	6,20
Veebruar	-3,06	86,97	-2,93	-1,88	99,80	8,47	72,04	18,08	35,47	18,10	18,65	28,44	19,83	28,44	4,34	6,28	5,60	3,55	4,16	5,04
Märts	1,17	82,02	1,26	2,28	100	9,47	66,11	15,78	39,39	15,65	16,15	38,94	16,91	37,86	5,70	6,11	5,48	4,30	5,61	5,72
Aprill	3,11	75,32	3,23	4,66	100	13,51	63,84	21,68	37,14	21,65	22,17	36,52	23,01	35,31	6,80	7,54	7,14	4,56	7,30	7,37

**Tabel L7.2. Jaanuari kuus põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus puhkeruumis mõõdetud tulemuste põhjal**

Kihi nr	Seina kihid	d	$\mu$	Sd	$\lambda d$	$\theta$	Psat	P	$\Phi$
		[mm]		[m]	[W/(mK)]	[°C]	[Pa]	[Pa]	[%]
i	Siseõhk					21,78	2607	784	30,06
si	Seina pind ruumis					20,76	2449	784	32,00
3	Savikrohv	40	8	0,32	0,8	20,62	2428	1253	51,60
2	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	10,69	1285	1089	84,71
	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	-1,58	536	531	99,07
1	Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	-3,23	466	415	89,07
se	Seina pind väljas					-3,39	460	415	90,24
e	Välisõhk								

## Lisa 7. Järg

**Tabel L7.3.** Veebruari kuus põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus puhkeruumis mõõdetud tulemuste põhjal

Kihi nr	Seina kihid	d	$\mu$	Sd	$\lambda d$	$\theta$	Psat	P	$\Phi$
		[mm]		[m]	[W/(mK)]	[°C]	[Pa]	[Pa]	[%]
i	Siseõhk					18,65	2149	611	28,44
si	Seina pind ruumis					18,10	2076	611	29,44
3	Savikrohv	40	8	0,32	0,8	18,08	2073	735	35,47
2	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	8,47	1107	797	72,04
	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	-1,88	522	521	99,80
1	Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	-2,93	478	411	86,00
se	Seina pind väljas					-3,06	473	411	86,97
e	Välisõhk								

**Tabel L7.4.** Märtsi kuus põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus puhkeruumis mõõdetud tulemuste põhjal

Kihi nr	Seina kihid	d	$\mu$	Sd	$\lambda d$	$\theta$	Psat	P	$\Phi$
		[mm]		[m]	[W/(mK)]	[°C]	[Pa]	[Pa]	[%]
i	Siseõhk					16,15	1835	714	38,94
si	Seina pind ruumis					15,65	1777	714	40,20
3	Savikrohv	40	8	0,32	0,8	15,78	1792	706	39,39
2	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	9,47	1184	783	66,11
	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	2,28	720	720	100,00
1	Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	1,26	669	545	81,48
se	Seina pind väljas					1,17	664	545	82,02
e	Välisõhk								

## Lisa 7. Järg

*Tabel L7.5. Aprilli kuus pöhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus puhkeruumis mõõdetud tulemuste põhjal*

Kihi nr	Seina kihid	d	$\mu$	Sd	$\lambda d$	$\theta$	Psat	P	$\Phi$
		[mm]		[m]	[W/(mK)]	[°C]	[Pa]	[Pa]	[%]
i	Siseõhk					22,17	2670	975	36,52
si	Seina pind ruumis					21,65	2587	975	37,70
3	Savikrohv	40	8	0,32	0,8	21,68	2591	962	37,14
2	Pöhupakk	250	2,5	0,625	0,08	13,51	1548	988	63,84
	Pöhupakk	250	2,5	0,625	0,08	4,66	851	851	100,00
1	Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	3,23	770	575	74,70
se	Seina pind väljas					3,11	763	575	75,32
e	Välisõhk								

**Lisa 8. Põhupakkidest saunahoone mittehomogeense välisseina mõõtmistulemused „leiliruumis“ 30 min intervalliga  
01.01.2017-24.04.2017 ja niiskustehniline analüüs tsoonis A**

**Tabel L8.1.** Põhupakkidest välisseina mõõtmistulemused leiliruumis

2017	$\theta_e$	$\phi_e$	$\theta_{se\_2}$	$\theta_{2\_1}$	$\phi_{2\_1}$	$\theta_{2\_2}$	$\phi_{2\_2}$	$\theta_{2\_3}$	$\phi_{2\_3}$	$\theta_{si\_2}$	$\theta_{i\_2}$	$\phi_{i\_2}$	$v_{2\_1}$	$v_{2\_2}$	$v_{2\_3}$	$v_e$	$v_{i\_2}$
Kuu	[°C]	[%]	[°C]	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[°C]	[%]	[g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]
Jaanuar	-3,39	90,24	-3,24	-1,23	99,70	9,35	83,60	18,04	99,96	19,29	20,5	32,24	4,61	7,71	15,95	3,64	5,80
Veebruar	-3,06	86,97	-2,93	-0,99	99,98	9,42	71,06	16,83	96,62	17,59	17,91	30,85	4,63	6,60	14,59	3,55	4,99
Märts	1,17	82,02	1,27	3,14	99,99	10,93	61,56	16,62	92,69	16,79	16,97	35,57	6,04	6,34	14,40	4,30	5,52
Aprill	3,11	75,32	3,24	5,39	98,52	15,51	58,64	22,91	77,76	23,36	23,45	33,20	6,99	7,94	17,08	4,56	7,16

**Tabel L8.2.** Jaanuari kuus põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus leiliruumis mõõdetud tulemuste põhjal

Kihi nr	Seina kihid	d	$\mu$	Sd	$\lambda d$	$\theta$	Psat	P	$\Phi$
		[mm]		[m]	[W/(mK)]	[°C]	[Pa]	[Pa]	[%]
i	Siseõhk					20,50	2410	777	32,24
si	Seina pind ruumis					19,29	2236	777	34,75
3	Savikrohv	40	8	0,32	0,8	18,04	2068	2067	99,96
2	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	9,35	1175	982	83,60
	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	-1,23	551	550	99,70
1	Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	-3,24	466	415	89,13
se	Seina pind väljas					-3,39	460	415	90,24
e	Välisõhk					-3,39	460	415	90,24

## Lisa 8. Järg

**Tabel L8.3.** Veebruari kuus põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus leiliruumis mõõdetud tulemuste põhjal

Kihi nr	Seina kihid	d [mm]	$\mu$	Sd [m]	$\lambda d$ [W/(mK)]	$\theta$ [°C]	Psat [Pa]	P [Pa]	$\Phi$ [%]
i	Siseõhk					17,91	2051	633	30,85
si	Seina pind ruumis					17,59	2010	633	31,48
3	Savikrohv	40	8	0,32	0,8	16,83	1916	1851	96,62
2	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	9,42	1180	839	71,06
	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	-0,99	563	562	99,98
1	Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	-2,93	478	411	86,03
se	Seina pind väljas					-3,06	473	411	86,97
e	Välisõhk								

**Tabel L8.4.** Märtsi kuus põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus leiliruumis mõõdetud tulemuste põhjal

Kihi nr	Seina kihid	d [mm]	$\mu$	Sd [m]	$\lambda d$ [W/(mK)]	$\theta$ [°C]	Psat [Pa]	P [Pa]	$\Phi$ [%]
i	Siseõhk					16,97	1933	688	35,57
si	Seina pind ruumis					16,79	1911	688	35,98
3	Savikrohv	40	8	0,32	0,8	16,62	1891	1752	92,69
2	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	10,93	1306	804	61,56
	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	3,14	765	765	99,99
1	Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	1,27	669	545	81,45
se	Seina pind väljas					1,17	664	545	82,02
e	Välisõhk								

## Lisa 8. Järg

**Tabel L8.5.** Aprilli kuus põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus leiliruumis mõõdetud tulemuste põhjal

Kihi nr	Seina kihid	d	$\mu$	Sd	$\lambda d$	$\theta$	Psat	P	$\Phi$
		[mm]		[m]	[W/(mK)]	[°C]	[Pa]	[Pa]	[%]
i	Siseõhk					23,45	2885	958	33,20
si	Seina pind ruumis					23,36	2870	958	33,38
3	Savikrohv	40	8	0,32	0,8	22,91	2793	2171	77,76
2	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	15,51	1761	1033	58,64
	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	5,39	896	883	98,52
1	Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	3,24	770	575	74,65
se	Seina pind väljas					3,11	763	575	75,32
e	Välisõhk								

## Lisa 9. Põhupakkidest saunahoone mittehomogeense välisseina mõõtmistulemused „leiliruumis“ 1 min intervalliga

21.04.2017 kell 18:00 – 23.04.2017 kell 24:00 ja niiskustehniline analüüs tsoonis A

**Tabel L9.1.** Põhupakkidest välisseina mõõtmistulemused leiliruumis 1min intervalliga

2017	$\theta_e$	$\phi_e$	$\theta_{se,2}$	$\theta_{2,1}$	$\phi_{2,1}$	$\theta_{2,2}$	$\phi_{2,2}$	$\theta_{2,3}$	$\phi_{2,3}$	$\theta_{si,2}$	$\theta_{i,2}$	$\phi_{i,2}$	$\theta_{i,2u}$	$\phi_{i,2u}$	$v_{2,1}$	$v_{2,2}$	$v_{2,3}$	$v_e$	$v_{i,2}$	$v_{i,2u}$
Aprill	[°C]	[%]	[°C]	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]
21.04.2017	5,55	63,82	5,92	7,41	89,44	17,15	56,87	50,50	59,28	60,49	64,92	13,87	74,77	8,69	7,11	8,65	56,68	4,46	22,55	20,05
22.04.2017	2,41	86,57	2,57	5,91	97,04	20,60	55,73	30,50	52,24	29,47	29,06	27,54	30,89	22,94	7,00	10,01	16,55	4,93	7,92	7,23
23.04.2017	2,29	80,18	2,42	4,94	99,86	16,77	51,88	23,40	57,66	23,44	23,37	29,87	23,77	27,22	6,76	7,40	12,09	4,52	6,26	5,83

**Tabel L9.2.** 21.04.2017 põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus leiliruumis mõõdetud tulemuste põhjal

Kihi nr	Seina kihid	d	$\mu$	Sd	$\lambda d$	$\theta$	Psat	P	$\Phi$
		[mm]		[m]	[W/(mK)]	[°C]	[Pa]	[Pa]	[%]
i	Siseõhk					64,92	24930	3458	13,87
si	Seina pind ruumis					60,49	20376	3458	16,97
3	Savikrohv	40	8	0,32	0,8	50,50	12638	7492	59,28
2	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	17,15	1955	1112	56,87
	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	7,41	1106	989	89,44
1	Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	5,92	983	610	62,00
se	Seina pind väljas					5,55	955	610	63,82
e	Välisõhk								



## Lisa 9. Järg

**Tabel L9.3.** 22.04.2017 põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus leiliruumis mõõdetud tulemuste põhjal

Kihi nr	Seina kihid	d [mm]	$\mu$	Sd [m]	$\lambda d$ [W/(mK)]	$\theta$ [°C]	Psat [Pa]	P [Pa]	$\Phi$ [%]
I	Siseõhk					29,06	4017	1106	27,54
Si	Seina pind ruumis					29,47	4113	1106	26,90
3	Savikrohv	40	8	0,32	0,8	30,50	4364	2280	52,24
2	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	20,60	2425	1352	55,73
	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	5,91	983	954	97,04
1	Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	2,57	753	643	85,43
Se	Seina pind väljas					2,41	743	643	86,57
E	Välisõhk								

**Tabel L9.4.** 23.04.2017 põhupakkidest välisseina niiskusrežiimi kontrollarvutus leiliruumis mõõdetud tulemuste põhjal

Kihi nr	Seina kihid	d [mm]	$\mu$	Sd [m]	$\lambda d$ [W/(mK)]	$\theta$ [°C]	Psat [Pa]	P [Pa]	$\Phi$ [%]
I	Siseõhk					23,37	2871	858	29,87
Si	Seina pind ruumis					23,44	2883	858	29,74
3	Savikrohv	40	8	0,32	0,8	23,40	2876	1659	57,66
2	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	16,77	1909	990	51,88
	Põhupakk	250	2,5	0,625	0,08	4,94	868	867	99,86
1	Lubikrohv	40	8	0,32	0,8	2,42	727	577	79,44
Se	Seina pind väljas					2,29	720	577	80,18
E	Välisõhk								

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Rain Allikmäe,

sünniaeg 10/02/1985,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

Põhupakkidest soojustusega puitkarkasshoonete ehitamise tehnoloogia ja ekspluatatsioon,

mille juhendajad on Martti-Jaan Miljan ja Jaan Miljan,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_  
(allkiri)

Tartu, 22.05.2017

---

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_  
(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_  
(kuupäev)

\_\_\_\_\_  
(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_  
(kuupäev)

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Andres Jürgenson,

sünniaeg 06/05/1982,

4. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

Põhupakkidest soovustusega puitkarkasshoonete ehitamise tehnoloogia ja ekspluatatsioon,

mille juhendajad on Martti-Jaan Miljan ja Jaan Miljan,

4.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

4.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

4.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

5. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

6. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_  
(allkiri)

Tartu, 22.05.2017

---

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_  
(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_  
(kuupäev)

\_\_\_\_\_  
(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_  
(kuupäev)